HERMANN HAKEN

FORMULAS DEL EXITO EN LA NATURALEZA

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

Hermann Haken

Fórmulas del éxito en la naturaleza

Sinergética: la doctrina de la acción de conjunto

SALVAT

Versión española de la obra original alemana *Erfolgsgeheimnisse der natur* publicada por Deutsche Verlags-Anstalt GmbH de Stuttgart

Traducción: Roberto Bein

Edición digital: Sargont (2017)

ISBN: 84-345-8246-5 Obra completa
ISBN: 84-345-8403-4
Depósito Legal: NA-468-86
Publicada por Salvat Editores. S.A., Barcelona
Printed in Spain

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

PRÓLOGO

Una y otra vez la naturaleza y, sobre todo, los reinos animal y vegetal nos sorprenden con la plétora de sus formas y sus estructuras sutilmente articuladas, cuyos diversos componentes actúan de manera conjunta y muy inteligente. Nuestros predecesores atribuían a esas estructuras un origen divino. Hoy día la ciencia manifiesta un creciente interés en averiguar cómo se forman y qué fuerzas intervienen en ese proceso. Mientras que poco tiempo atrás aún parecía que su formación espontánea contradecía los principios de la física, el presente libro constituye un punto de inflexión en el pensamiento. Para ello partimos del reconocimiento de que también en la materia inanimada surgen del caos estructuras nuevas, bien ordenadas, que pueden persistir a condición de que reciban un permanente suministro de energía. Daremos al respecto ejemplos muy ilustrativos pertenecientes a los ámbitos de la física y la química, como el ordenamiento en el rayo láser, la formación de dibujos en forma de panal en los líquidos y las ondas químicas en espiral. Como mostrarán esos ejemplos, la formación de estructuras obedece a leyes de validez universal. Esta constatación nos permitirá ocupamos luego de problemas aún más complejos: cómo se rige, la formación de los distintos tipos de células en los animales, de qué manera los comportamientos colectivos de las empresas pueden determinar la evolución de la economía y a qué reglas obedece la formación de la opinión pública. En estos procesos casi siempre tienen que actuar de forma conjunta e inteligente muchos componentes distintos. Se trata, como suele decirse, de sistemas complejos, que pueden examinarse desde diversos puntos de vista: se puede analizar el funcionamiento de sus componentes por separado u observar más bien el conjunto. En el primer caso se deberá partir, como en un juego, de reglas que determinen los diversos pasos de las partes hasta conformar un «modelo». Este proceder está expuesto de manera muy sugestiva en la obra *Das Spiel* («El juego») de Manfred Eigen y Ruthild Winkler (Edit. Piper, 1976).

El segundo camino es el de la sinergética, es decir, el «estudio de la acción de conjunto». En la sinergética no solemos estudiar las diversas reglas elementales, sino las leyes generales que rigen la formación de las es-

tructuras. Aunque no se ajuste muy bien a nuestro tema, permítasenos establecer el siguiente paralelismo: podemos jugar innumerables veces al ajedrez e ir observando los movimientos de cada una de las piezas. Pero también podemos preguntarnos: ¿qué se puede decir sobre la situación final? En el caso de la partida de ajedrez, desde luego, todos sabemos lo que puede ocurrir: o queda en jaque mate uno de los reyes, o la partida termina en tablas. A pesar de que las diversas etapas sean, en su conjunto, sumamente complicadas, el resultado final se puede expresar en pocas palabras. Algo similar sucede con las formaciones de estructuras analizadas en esta obra: nuestras preguntas se dirigirán hacia los modelos globales que se forman al final. Comprenderemos entonces que hay cursos inevitables, generales y de orden superior que llevan a la formación de nuevas estructuras, de nuevos modelos. Los conocimientos sobre conductas colectivas obtenidos en el ámbito científico también gravitan ampliamente en el terreno interpersonal, tanto en la vida económica como en la social. Pero en esos campos el presente libro no ofrece soluciones acabadas. Más bien intenta sugerir modos de pensar; no pretende imponer recetas para la conducta personal. Incluso plantearemos y demostraremos la tesis de que a veces resulta imposible hallar soluciones inequívocas, lo cual arrojará nueva luz sobre la naturaleza de algunos conflictos y sobre el modo de resolverlos.

El campo de la sinergética se encuentra en medio de una tempestuosa evolución, de la que dan fe, entre otros, el creciente número de congresos internacionales dedicados a ella y el hecho de que la fundación Volkswagen esté fomentando su estudio en el terreno técnico y de las ciencias naturales mediante un programa de prioridades. La editorial Springer le está dedicando la colección *Springer Series in Synergetics*. El objetivo de este libro es hacer accesible al lector profano, pero interesado en la materia, este nuevo campo que está fascinando a los científicos.

A menudo se habla hoy día de una «deuda de divulgación» de la ciencia. A mi entender, ciencia y sociedad viven en una simbiosis indisoluble. La sociedad es tan vital para la ciencia como ésta lo es para aquélla. Por tanto, todo puente que se tienda entre ambas será positivo. No es fácil para los científicos saldar la mencionada deuda de aportación, y frecuentemente no se trata de un problema de voluntad, sino de que el lenguaje de la ciencia —sobre todo, cuando se sirve de las matemáticas— se ha alejado tanto del lenguaje corriente que su traducción resulta muy difícil. Con todo, diría que

muchas veces los científicos sólo comprenden plenamente un proceso, tanto científico como económico, cuando logran expresarlo también en términos del lenguaje corriente y sin fórmulas matemáticas. Precisamente la necesidad de hacerse entender por el profano conduce al científico a captar nexos más globales.

Espero que mi exposición de este nuevo campo también brinde sugerencias e indicios respecto de la manera en que las fórmulas del éxito en la naturaleza se pueden usar en bien propio y de la humanidad.

Agradezco a mi esposa la revisión crítica del manuscrito y las valiosas propuestas para mejorarlo. A la señora Ursula Funke le doy las gracias por su rápida y perfecta preparación del manuscrito. Su incansable entusiasmo fue decisivo para que esta obra llegara a buen término.

Asimismo expreso mi reconocimiento a la editorial Deutsche Verlags-Anstalt, y en especial al Dr. Lebe y a la señora Locke, por su eficaz colaboración.

Hermann Haken

I. INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES

Por qué este libro puede ser de interés para el lector

Nuestro mundo está integrado por una enorme variedad de cosas. Muchas de ellas han sido creadas por la mano del hombre: casas, automóviles, herramientas, cuadros. Pero muchas otras tienen un origen natural. Para el científico, este mundo de las cosas se convierte en un mundo de estructuras y ordenamientos sometido a leyes estrictas. Si dirigimos nuestros telescopios hacia las distancias inconmensurables del espacio, vemos galaxias espirales como la que se reproduce en la figura 1.1. Podemos reconocer claramente los brazos en espiral que confieren a la galaxia su estructura, su articulación. El gas que hay en ellos origina incesantemente incontables nuevos soles resplandecientes. Nuestra propia Tierra y nuestro Sol pertenecen a una galaxia: la Vía Láctea. En noches serenas la vemos con toda nitidez. En ella, el nuestro es uno más entre cien mil millones de soles..., un número casi inimaginable. La Tierra, junto con otros planetas, gira alrededor del sol, en órbitas sometidas a leyes de hierro.

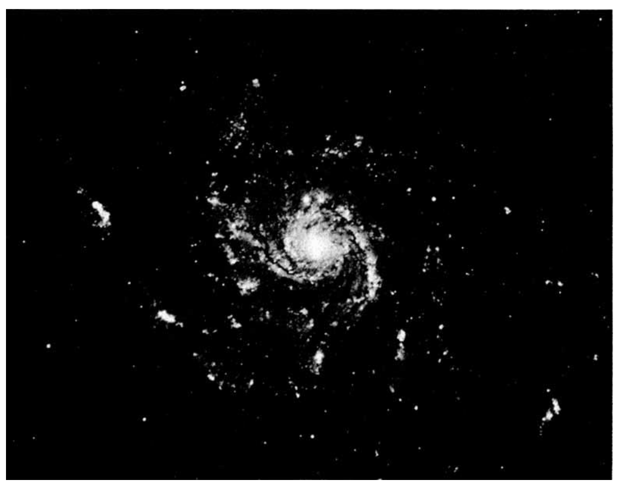
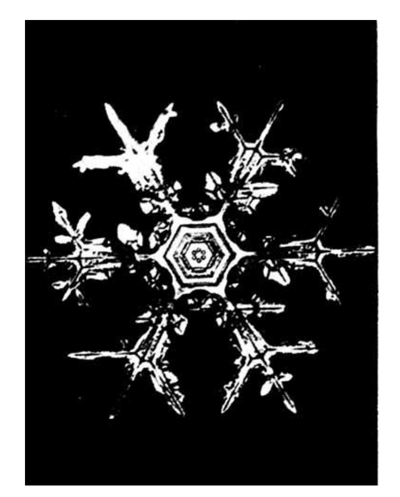


Fig. 1.1: ejemplo de una nebulosa espiral.

Para encontrar estructuras, sin embargo, no es preciso observar el cosmos. Nuestro entorno cotidiano nos ofrece innumerables ejemplos, como la simetría de los cristales de nieve (fig. 1.2). La naturaleza viviente nos sorprende una y otra vez con la riqueza de sus formas, a veces sumamente grotescas. La figura 1.3 nos muestra la imagen aumentada del ojo de una mosca tropical. El ojo se encuentra en el extremo de un «asta» que sobresale de la cabeza. Su estructura en forma de panal de abejas nos fascina por su norma. A la vez, toda la «construcción» parece muy adecuada, pues permite una visión perfecta en un ángulo de 360 grados. A menudo también nos maravilla la armonía de las formas, increíblemente diversas, de los animales y plantas, que se nos presentan en increíble variedad. En muchos casos, la estructura de los seres vivientes parece sumamente funcional; en otros, juguetona y caprichosa: pensemos, por ejemplo, en la belleza y colorido de las flores.



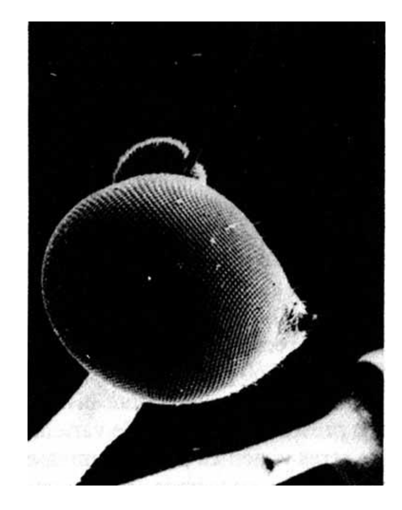


Fig. 1.2: cristal de nieve.

Fig. 1.3: asta del ojo de una mosca tropical (Diopsis thoracica). Llama la atención, entre otras cosas, la estructura hexagonal.

Pero no sólo las estructuras inmóviles despiertan nuestra sorprendida admiración. También nos llenan de gozo los movimientos ordenados, como

por ejemplo el trote de un caballo o la gracia de una danza. En la convivencia humana hallamos estructuras a un nivel aún superior. La sociedad se ordena conforme a determinados sistemas políticos que pueden ser de naturaleza totalmente diferente. No faltan tampoco las estructuras en el dominio estrictamente espiritual, como en la lengua, la música y, por fin, en el mundo de la ciencia. Nos encontramos con ellas, pues, por doquier: desde el mundo inorgánico, pasando por la naturaleza animada, hasta la esfera del espíritu. Muchas veces estamos tan habituados a la presencia de estas estructuras, que hemos dejado de ser conscientes del milagro de su existencia.

Nuestros predecesores les atribuían un origen divino; así lo señala, entre otros, el relato de la creación en el Antiguo Testamento. Durante mucho tiempo la ciencia se ocupó casi exclusivamente de la configuración de las estructuras, y no de su formación. El interés en investigar esta última cuestión es sólo reciente. Si no queremos explicarlas apelando a una fuerza sobrenatural, es decir, a un nuevo acto de creación, será tarea de los científicos aclarar su formación autónoma o, dicho de otro modo, su autoorganización.

La búsqueda de una concepción global del mundo

A primera vista, intentar averiguar cómo se ha formado este sinnúmero de estructuras parece una empresa inacabable. Si su mera elucidación ya absorbió, y sigue absorbiendo, a muchas generaciones de investigadores, ¿no supondrá un esfuerzo aún mucho mayor descubrir el secreto de su origen? En efecto: si la formación de cada estructura singular se rigiera por leyes específicas, un solo libro no bastaría para explicarlas y ese saber abarcaría una biblioteca inimaginable.

Pero en este punto nos asalta una idea que atraviesa toda la ciencia como hilo conductor: a la acumulación de datos de la realidad se opone el deseo de desarrollar una cosmovisión unitaria, una concepción única del mundo. Conocemos estos esfuerzos sobre todo en el terreno de las ciencias naturales (física, química, biología), pero también en el de la filosofía. A todos nos resulta familiar la búsqueda de las leyes fundamentales de la física. Gracias a las leyes de la dinámica y de la gravitación de Isaac Newton (1642-1727) comprendemos el movimiento de los planetas alrededor del

sol, movimiento que en la antigüedad no se podía explicar mediante ninguna ley unitaria. James Clark Maxwell (1831-1879) nos permitió comprender que la luz no es sino una oscilación electromagnética, igual que una onda radioeléctrica. Albert Einstein (1879-1955) consiguió relacionar la gravedad con el espacio y el tiempo. En química, Dimitri I. Mendeleiev (1834-1907) introdujo por primera vez una ordenación de las innumerables sustancias mediante el sistema periódico de los elementos. La moderna física atómica logró reducir este sistema a las leyes fundamentales de la estructura atómica. En biología, las leyes de Mendel explicaron la transmisión de ciertos rasgos a través de la herencia, cuando se cruzan flores de distintos colores, por ejemplo. En nuestros días se ha descubierto la base química de la herencia, en forma de macromoléculas bioquímicas del llamado ADN (ácido desoxirribonucleico).

Estos ejemplos, a los cuales podríamos añadir muchísimos más, demuestran la repetida posibilidad de explicar los sucesos naturales mediante nuevas leyes fundamentales globales.

Así, mientras por una parte se consiguen explicar los fenómenos más diversos mediante unas pocas leyes básicas, al mismo tiempo las investigaciones aportan continuamente nuevos datos sobre fenómenos cada vez más complejos, y a menudo estamos a punto de ahogarnos bajo esta superabundancia de materiales. En la ciencia se desarrolla así una permanente carrera entre la avalancha de datos nuevos y su ordenación, comprensión y síntesis a través de unas leyes generales.

División o integración

¿Qué posibilidades reales tenemos de comprender las estructuras o sus procesos internos? Un procedimiento aceptado, y que frecuentemente da buenos resultados, consiste en dividir los objetos de investigación en componentes cada vez más pequeños. El físico, por ejemplo, divide el cristal en sus componentes, los átomos (en el capítulo 3 trataremos los cristales con mayor detenimiento), o sigue dividiendo los átomos en partículas aún menores, los núcleos atómicos y los electrones. Una rama importante de la investigación física moderna se ocupa de partículas todavía «más elementales», los quarks y los gluones, aunque, quizá tampoco éstos sean los componentes elementales y últimos de la materia. El biólogo prepara células

separadas de los tejidos; luego continúa dividiendo las células en partes, como las membranas o el núcleo celular, hasta llegar a sus propios componentes, en forma de biomoléculas. A estos ejemplos se podrían agregar muchos otros procedentes de los más diversos ámbitos científicos. De hecho, hasta la propia ciencia ya aparece dividida en distintas ramas separadas: desde las matemáticas, la física y la química, hasta llegar a la sociología y la psicología.

Pero con este método, al investigador puede ocurrirle como al niño a quien acaban de regalarle un cochecito de juguete. El pequeño no tarda en querer averiguar cómo se mueve el coche y lo desmonta por completo, cosa que en general no le resulta difícil. No es raro que acabe llorando ante las piezas, sin haber logrado entender por qué se movía el coche y a veces incluso es incapaz de recomponer las piezas. Así comprende muy pronto el sentido de la afirmación de que el todo es más que la suma de sus partes o, en palabras de Goethe: «Ahora tengo las partes en la mano, mas lamentablemente les falta el vínculo espiritual.» Lo cual, traducido a las más diversas ciencias, significa que una vez comprendida la configuración de una estructura, aún falta averiguar cómo interactúan sus componentes. Como veremos más adelante, esto está estrechamente asociado al origen de las estructuras.

Aquí es donde interviene la sinergética. Este término, que proviene del griego, como muchos otros conceptos científicos, significa «estudio o ciencia de la acción de conjunto». Su propósito es averiguar si, pese a la plétora y diversidad de las estructuras que encontramos en la naturaleza, es posible hallar unas leyes fundamentales globales que permitan explicar su formación. Sin duda todo esto suena muy abstracto y poco ilustrativo. Tampoco quiero ocultar que la respuesta exacta sólo puede encontrarse en una teoría matemática que yo mismo he desarrollado para una amplia gama de fenómenos. Pero, al mismo tiempo, precisamente gracias a la variedad de fenómenos a nuestra disposición podemos presentar los procesos fundamentales de manera muy gráfica. Para ello podremos recurrir a ejemplos sencillos, como los de la mecánica. Desde luego no pretendo trazar aquí una imagen mecanicista del mundo, pero incluso en nuestro lenguaje cotidiano empleamos muchos conceptos tomados de la mecánica. Pensemos, por ejemplo, en el término «equilibrio». Desde el punto de vista etimológico, la palabra hace referencia a una balanza *(libra*, en latín) cuya carga es igual

(cequus) a sus pesas. La balanza no se mueve; está en equilibrio. Pero, en cambio, cuando hablamos de una persona equilibrada, a nadie se le ocurriría tachar nuestra interpretación psicológica de mecanicista. El lector deberá tener presente este ejemplo a lo largo del libro, en el cual no trataremos únicamente del origen de las estructuras del mundo material, sino también de las del mundo ideal, como los procesos económicos y las evoluciones culturales.

¿Existen contradicciones entre las estructuras biológicas y las leyes naturales fundamentales?

La física pretende ser la ciencia natural por excelencia. Se ocupa de la materia y, como todo está formado por materia, todo lo material tiene que satisfacer las leyes de la física. En el pasado, numerosos científicos—los biólogos, entre ellos— no compartían esta convicción. Los vitalistas sostenían precisamente que los seres vivientes estaban animados por una fuerza vital propia y específica. Pero desde que se ha logrado explicar los fenómenos químicos como procesos físicos (piénsese, por ejemplo, en el enlace químico o en la estructura atómica), casi nadie duda de que, en principio, debería ser posible reducir también los fenómenos biológicos a términos físicos. Aunque en esta afirmación hemos dejado una puerta abierta con la expresión «en principio». Como veremos más adelante, esta formulación oculta todo un cúmulo de problemas.

Atengámonos a la afirmación —demasiado ingenua, en el fondo— de que las leyes físicas también tienen vigencia en la biología. Hace aún pocos años, la tesis de que la biología podía reducirse a la física desembocaba rápidamente en contradicciones insolubles. Si en aquella época se le hubiera preguntado a un físico si el origen de la vida se ajustaba a las leyes fundamentales de la física, tendría que haber contestado con un honesto no. ¿Por qué? Porque según las leyes fundamentales de la física y, más concretamente, las de la termodinámica, el desorden en el mundo debía ir en continuo aumento. Todo desarrollo funcional regular debería cesar y todo orden se desmoronaría.

La única salida que veían muchos científicos, y ante todo algunos destacados físicos, era considerar la formación de situaciones ordenadas en la naturaleza como un gigantesco fenómeno de fluctuación, el cual, conforme

a las reglas de la teoría de la probabilidad, debía ser además ciertamente improbable. Era una idea absurda, pero parecía la única aceptable en el marco de la llamada física estadística.

En el capítulo 2 expondremos por qué los físicos consideraban que el desorden debía ir continuamente en aumento. Como veremos, la física deja abierta una primera salida para la formación de estructuras (por ejemplo, para el caso de los cristales). Pero éstas son, como también veremos, estructuras muertas, que nada tienen que ver con procesos vitales. ¿Se había metido la física en un callejón sin salida al afirmar que los fenómenos biológicos se basaban en leyes físicas, pero que el propio origen de la vida contradecía las leyes fundamentales de la física? Una feliz coincidencia nos ayudó a salir del atolladero. Descubrimos que la física misma nos brindaba un bello modelo de procesos en los que surge un cierto tipo de orden vivo, que sin embargo obedece estrictamente las leyes de la física; es más: sólo éstas lo posibilitan. Nos referimos al láser, una nueva fuente luminosa que se ha difundido mucho en estos años. El láser nos demuestra que la materia inanimada también puede autoorganizarse para producir fenómenos que parecen racionales. A través de él descubriremos curiosas normas que aparecen, a modo de hilo conductor, en todos los fenómenos de la autoorganización (fig. 1.4). Observaremos que los componentes se van ordenando como impulsados por una mano invisible, pero que al mismo tiempo esta mano invisible, que llamaremos «ordenador», sólo nace de la interacción de los sistema individuales. Una vez más, parecemos haber caído en un círculo vicioso.

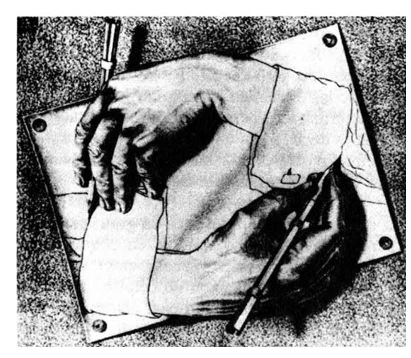


Fig. 1.4: este dibujo de Escher de dos manos que se dibujan mutuamente ilustra la problemática de la auto organización: el ordenador (una de las manos) determina el comportamiento de las distintas partes del sistema (la otra mano) y es a su vez determinado en su comportamiento por el de las partes del sistema.

El ordenador nace de la acción de conjunto de las partes individuales y, recíprocamente, el comportamiento de éstas está gobernado por aquél. Es como el antiguo enigma de qué fue primero: el huevo o la gallina (pero nadie habla del gallo).

Expresado en términos de la sinergética, el ordenador esclaviza a las partes individuales. Es como un titiritero que hace bailar a las marionetas, a la vez que éstas actúan sobre el titiritero, lo dirigen. Como veremos, el principio de esclavización tiene un papel central en la sinergética. Pero quisiéramos advertir ya de entrada que no se trata en absoluto de un juicio de valor. El principio expresa una determinada relación de causa-efecto, pero no tiene nada que ver con una esclavización en sentido ético. Los integrantes de un pueblo, por ejemplo, son esclavizados por su idioma.

Al investigar otros fenómenos, primero físicos, pero luego también químicos y finalmente biológicos, desde la perspectiva del ordenador y la esclavización, volví a topar una y otra vez con el mismo fenómeno: los procesos de formación de las estructuras parecen avanzar casi forzosamente en un sentido determinado, pero en modo alguno tal como predecía la termodinámica, es decir, hacia un creciente desorden. Muy al contrario: incluso sistemas parciales aún no ordenados se ven incorporados a la situación de orden, que los esclaviza en su comportamiento.

Esta génesis forzosa del orden a partir del caos en gran medida es independiente, como veremos, del sustrato material en el que tienen lugar los procesos. En este sentido, un láser puede comportarse igual que una formación de nubes o una agrupación de células. Salta a la vista que se trata de un fenómeno uniforme, lo cual nos sugiere que tales normas pueden encontrarse también en la esfera de lo no material. En este campo podemos citar, por ejemplo, fenómenos sociológicos como el comportamiento de grupos enteros que parecen someterse de pronto a una idea novedosa: a una moda, a las corrientes culturales, a una nueva tendencia pictórica o a un nuevo estilo literario.

Como en seguida veremos, estas normas nos permiten acceder a la comprensión de los secretos de los éxitos de la naturaleza. ¿Cómo logra producir ésta, por ejemplo, especies cada vez más complejas en el mundo animado? ¿Cómo logran prevalecer algunas especies y desplazar a otras? ¿Cómo es posible, por otra parte, que a pesar de la más encarnizada com-

petencia ciertas especies puedan convivir e incluso estabilizarse mutuamente gracias a su coexistencia? En este sentido, fenómenos que anteriormente se consideraban aislados, aparecen como ejemplos de una norma uniforme bajo nuestro nuevo enfoque. De pronto se aclaran relaciones antes enigmáticas e incluso contradictorias. Comprenderemos que el comportamiento colectivo de muchos individuos aislados —ya sean átomos, moléculas, células, animales o seres humanos— es el que determina indirectamente su propio destino a través de la competencia, por una parte, y la cooperación, por la otra. Aunque a menudo los individuos serán más bien objetos que sujetos de los cambios.

La sinergética puede contemplarse, por consiguiente, como una ciencia del comportamiento colectivo ordenado y autoorganizado, sometido a leyes universales. En cualquier ciencia, la formulación de afirmaciones de validez muy general tiene necesariamente consecuencias importantes. La sinergética abarca disciplinas muy diversas, como la física, la química y la biología, pero también la sociología y la economía. Por ello —y ésta es la primera consecuencia— cabe esperar que las normas descritas y descubiertas por la sinergética ya estén presentes, de forma más o menos oculta, en las diversas disciplinas. Con lo cual veremos formarse, precisamente en el sentido de la sinergética, un nuevo cuadro a partir de muchos hechos individuales, como en un rompecabezas.

Pero tampoco podemos omitir una segunda consecuencia. En ciencia siempre se ha demostrado prematuro atribuir a una ley una validez absolutamente universal. Los científicos han constatado una y otra vez que leyes naturales, que dentro de ciertos alcances resultaban verdaderas y demostrables, sólo podían considerarse una aproximación o incluso llegaban a perder toda validez en dominios más amplios. La mecánica de Newton, por ejemplo, no es más que una aproximación a la mecánica de la teoría de la relatividad de Einstein. La mecánica clásica, que describe el movimiento de los cuerpos macroscópicos, tuvo que ser reemplazada por la mecánica cuántica en el mundo microscópico de los átomos. La sinergética es, análogamente, más amplia que la termodinámica y tiene un campo de aplicación mucho más extenso. Sin embargo, la propia sinergética se verá sometida a restricciones. Para explicarlas deberemos distinguir entre los propósitos de esta ciencia y sus logros actuales. La tarea de la sinergética es descubrir las normas en que se basa la autoorganización de sistemas en los más diversos

campos científicos. Ya ha conseguido hallar tales normas generales precisamente para los casos más interesantes, a saber, aquellos en los que se forman nuevas estructuras o se modifican radicalmente los estados macroscópicos de los sistemas. Pero, ¿qué son estados macroscópicos y qué significa radicalmente? Para aclarar estos conceptos aportaré un gran número de ejemplos, que considero más ilustrativos que las largas explicaciones. Espero que esto permitirá al lector introducirse paso a paso en la problemática de la sinergética, así como en sus resultados.

Todos los procesos vitales, desde los de la célula aislada hasta la convivencia de la humanidad con la naturaleza, guardan una estrecha interrelación; todas las partes se imbrican directa o indirectamente unas con otras. Por tanto, siempre nos hallaremos ante sistemas muy intrincados, es decir, complejos. La creciente densidad de población y los avances de la tecnología aumentan continuamente la complejidad de nuestro mundo. Con ello aumenta también la importancia de llegar a comprender el comportamiento de los sistemas complejos. En este campo la sinergética ofrece nuevas y fundamentales ideas, como iremos viendo a lo largo de este trabajo. Un sistema complejo es como un libro voluminoso. Para conocerlo de verdad, para captar plenamente su contenido, tendríamos que leerlo desde la primera hasta la última página. Pero, ¿qué podemos hacer si carecemos del tiempo suficiente? Se nos ofrecen diversas alternativas: por ejemplo, leer de tanto en tanto unas pocas páginas escogidas al azar, o también utilizar el resumen que pueda ofrecernos un tercero. Un resumen puede confeccionarse desde muy distintos puntos de vista: para una persona, el tema central del libro puede ser la historia de amor, mientras que otra se inclinará por destacar el medio social descrito. Finalmente, en general también es posible clasificar un libro con uno o varios conceptos, como «novela histórica», «libro técnico», «novela policiaca», etc. También tienen interés otras clasificaciones, como «género invendible» o *«best-seller»,* por ejemplo.

Dado que el cerebro humano (e incluso la suma de los cerebros de todos los científicos) puede admitir sólo una cantidad limitada de información, en el caso de sistemas complejos deberemos proceder como con un libro demasiado extenso: tendremos que buscar una información sucinta y de interés, es decir pertinente para nuestro objetivo. Pero aun cuando pudiéramos recopilar todos los datos, ello iría más en contra que en pro de la cla-

ridad de nuestro juicio. Los árboles no nos dejarían ver el bosque; imposible encontrar mejor proverbio para ilustrar la problemática de los sistemas complejos. No debemos quedarnos «enganchados» en detalles sin importancia. Tenemos que aprender a ver y comprender la interrelación global, a «reducir la complejidad».

Ahora bien, como muestra la sinergética, en el caso de los sistemas complejos la «información pertinente», la interrelación global, nos la suministran los ordenadores, los cuales aparecen con especial nitidez en los momentos de transformación del comportamiento macroscópico de los sistemas. Por lo común, estos ordenadores son las magnitudes de larga vida que esclavizan a las de vida breve. Varios ejemplos lo aclararán.

Si al surgir un orden del caos y al transformarse un ordenamiento en otro rigen normas tan universales, estos procesos deben de poseer cierto grado de automatismo. Cuando aprendemos a reconocer estas normas también en los terrenos económico, sociológico o político, nos resulta más fácil dominar las dificultades en que se ve envuelta nuestra vida. Comprendemos, por ejemplo, que una actitud adversa de terceros no se basa en una conjura, sino que las demás personas actúan e incluso tienen que actuar así a raíz de determinados modos de comportamiento colectivo. El conocimiento de estos automatismos incluso puede hacerlos funcionar en nuestro provecho. La ley del equilibrio nos permite levantar grandes pesos con poca fuerza; de manera análoga, mediante la aplicación de las leyes sinergéticas logramos grandes efectos con un esfuerzo mínimo. Así podremos aprovechar en beneficio propio las fórmulas del éxito en la naturaleza.

A lo largo del libro veremos continuamente que el mundo animado sólo pudo o *tuvo que* desarrollarse en tan amplia medida porque no contaba con fuentes ni recursos inagotables. Además, el mundo debe desarrollar sus procesos en espacios de tiempo limitados, a semejanza de lo que suele ocurrir en la vida humana. Sin embargo, precisamente esas limitaciones exteriores impulsaron el desarrollo de la naturaleza y llevaron a la aparición de siempre renovadas especies de seres vivientes. No creo que sea casual que la técnica y la civilización hayan progresado más en los países que no tienen sólo un verano eterno, sino también un gélido invierno.

Para introducirnos en la sinergética resulta muy natural ir avanzando de los fenómenos sencillos a procesos cada vez más complejos. Por ello co-

menzaremos con ejemplos de la física y la química, para estudiar más adelante cuestiones de economía, sociología y epistemología. No es nuevo el método de trasladar experiencias obtenidas sobre la base de ejemplos simples a otros más complejos. En sociología y en economía política, por ejemplo, se han desarrollado modelos orientados en los de la física. Estos modelos hacen frecuente uso del concepto físico de «entropía», que constituye una medida del desorden.

Sin embargo, con los nuevos conocimientos, obtenidos primeramente en la física, comienza a prevalecer ya una nueva forma de pensar en otras ramas científicas. Mientras antes se consideraba que la estructura de una sociedad era estática y se hallaba en equilibrio, actualmente nuestra visión ha cambiado por completo. Las estructuras nacen y se desvanecen, compiten, cooperan y se ensamblan para formar estructuras mayores. Hemos llegado a un punto de inflexión del pensamiento con el paso de la estática a la dinámica.

Antes de abordar todas estas cuestiones, debemos discutir la principal objeción de la física a la formación de estructuras: el principio del desorden siempre creciente.

II. ¿AUMENTA INCESANTEMENTE EL DESORDEN? LA MUERTE TÉRMICA DEL MUNDO

La naturaleza avanza en un solo sentido

Una de las ventajas de la física es que desarrolla los procesos de la naturaleza bajo condiciones experimentales estrictamente controladas. Una vez comprobado que los procesos discurren siempre de igual manera, la física está en condiciones de formular leyes naturales de validez universal. Algunas de estas leyes pueden comprobarse en la vida cotidiana. Cuando calentamos una barra de hierro por un extremo, al cabo de cierto tiempo la temperatura de la barra se va nivelando, y finalmente llegar a ser igual en toda la barra (fig. 2.1). Nunca se observa el fenómeno inverso, esto es, que un extremo de la barra de hierro se caliente espontáneamente y el otro se enfríe. Si juntamos un recipiente lleno de gas con uno vacío y quitamos el tabique de separación, el gas penetra silbando en el segundo recipiente hasta quedar repartido por igual en ambos (fig. 2.2). Tampoco se observa jamás el proceso inverso: que en un recipiente lleno de gas las moléculas de pronto se concentren en una de las mitades del recipiente.

Cuando viajamos en coche y frenamos, éste finalmente se detiene, con lo cual se calientan los frenos y llegado el caso también los neumáticos. En cambio, un coche jamás se ha puesto en marcha por calentamiento de sus frenos y neumáticos.



Fig. 2.1: la temperatura de una barra de hierro calentada por un extremo va nivelándose. El resultado es una barra de hierro de temperatura media.

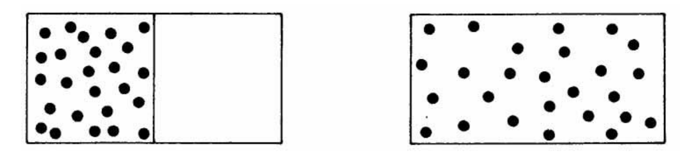


Fig. 2.2: si quitamos el tabique de separación entre los recipientes de la izquierda, los átomos de gas se distribuirán por igual en ambos recipientes.

Todos estos procesos naturales avanzan a todas luces en un solo sentido. El proceso inverso está prohibido. Se trata de los llamados procesos irreversibles.

El genial físico austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) consiguió ofrecer por primera vez, en el siglo pasado, una respuesta decisiva para la resolución del problema de por qué los procesos naturales avanzan en un sentido determinado. Afirmó que los procesos discurren en el sentido de un desorden siempre creciente.

¿Qué es desorden?

¿Cómo puede definirse el desorden? El concepto físico de desorden es bastante similar al del lenguaje cotidiano. ¿Cuándo decimos, por ejemplo, que la habitación de un niño está desordenada? Cuando no está arreglada, es decir, cuando los diversos objetos (libretas, libros, etcétera) no se hallan en el lugar que les corresponde (fig. 2.3). El libro de biología, por ejemplo, no está en la estantería, sino en la mesa o en el alféizar de la ventana, en la silla, encima de la cama, en el suelo o en cualquier otro sitio. Tiene, pues, muchas posibilidades de estar en distintos lugares. Otro tanto ocurre con la libreta, la estilográfica o la goma de borrar. Si por el contrario todos los objetos se hallan en el lugar que tienen asignado, tendremos ante nuestros ojos el estado de «habitación arreglada», es decir, de orden. Por tanto, existe *un solo* estado ordenado. Al mismo tiempo comprenderemos que el desorden está relacionado con el gran número de lugares posibles en los que puede hallarse un objeto. Precisamente por esto nos resulta tan difícil localizar un objeto en medio de una situación de desorden. Subrayémoslo una vez más: es el gran número de posibilidades de ubicación del objeto lo que comporta esa situación. También en física es esta multiplicidad de posibilidades la que da una medida del desorden, como podemos ver con el sencillo ejemplo del gas. Consideremos el modelo de un gas formado por sólo cuatro moléculas numeradas del 1 al 4, que podremos distribuir en dos cajas.



Fig. 2.3: así representa el caos el artista Escher. En el caos aparentemente nada está en el sitio que le corresponde (por ejemplo, en el cubo de la basura).

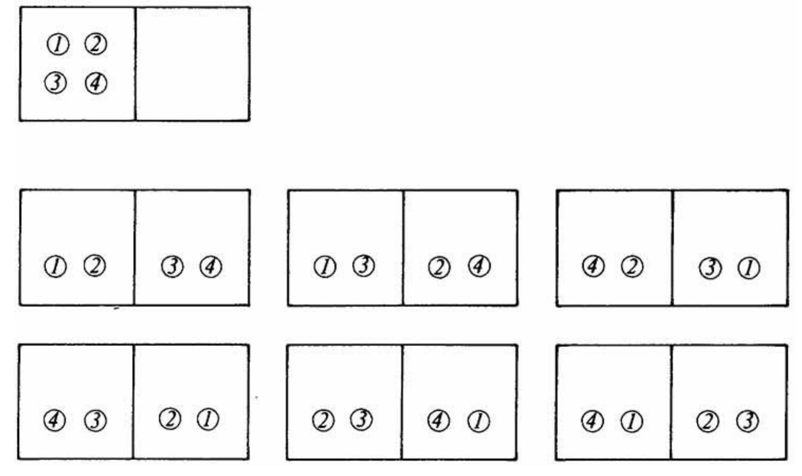


Fig. 2.4: ilustración de la prescripción de cálculo de Boltzmann para averiguar la máxima entropía. Esquema superior: hay una sola posibilidad de colocar las cuatro esferas en uno de los recipientes. Esquemas inferiores: hay seis posibilidades de repartir homogéneamente las cuatro esferas en dos recipientes.

Hay *una sola* posibilidad de colocar las cuatro moléculas en una de las cajas, como por ejemplo en la caja superior izquierda de la figura 2.4.

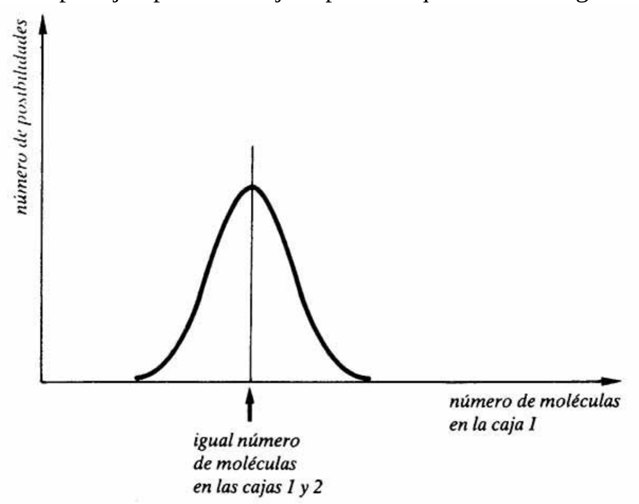


Fig. 2.5: esta gráfica representa una llamada curva de distribución cuando el número de moléculas es muy elevado. El máximo de la curva señala el estado en que las moléculas de gas están repartidas uniformemente entre dos recipientes. Cuando la distribución es desigual, el número de posibilidades distintas disminuye rápidamente.

En cambio existen seis posibilidades distintas de distribuir las esferas por pares en las dos cajas, como puede verse en la figura. Desde un punto de vista macroscópico, es decir, sin entrar en detalles, en un caso todas las moléculas se hallan en una caja; en el otro, las moléculas están repartidas a partes iguales entre las dos cajas. Ahora bien, según el principio de Boltzmann, la naturaleza tiende hacia situaciones en las que pueda realizarse el máximo número de posibilidades, y el concepto físico de entropía está determinado por el respectivo número de estas posibilidades (mejor dicho, por el logaritmo de este número). La naturaleza tiende, pues, hacia la situación de máxima entropía.

En nuestro ejemplo de cuatro moléculas teníamos seis posibilidades de «distribución equitativa» frente a una posibilidad de agrupar «todas las moléculas en una caja». En la naturaleza, la cantidad de moléculas contenidas

en un solo centímetro cúbico de gas es enorme; correspondientemente, el número de posibilidades de distribución homogénea en dos cajas es sencillamente gigantesco. Por esto también es muy alta la probabilidad de que la naturaleza realice la situación de distribución homogénea, y todas las desviaciones de esta situación serán, a lo sumo, una pequeña fluctuación, como por ejemplo una variación de densidad (fig. 2.5).

Sin embargo, el pleno alcance del principio Boltzmann sólo se comprende al analizar los procesos en movimiento, lo cual implica efectivamente el recuento de las posibilidades realizables. Con frecuencia el escritorio de un profesor da la impresión de estar muy desordenado. Pero si la mujer de la limpieza se lo ordena, al día siguiente nuestro profesor estará terriblemente irritado porque —según afirma— ya no encuentra sus papeles, cosa que antes no le hubiera ocurrido. ¿Cómo es posible? ¿Se trata de una manía del profesor o tiene razón al quejarse?

La explicación de este hecho contradictorio es la siguiente: con el escritorio aparentemente desordenado para el profano, el profesor sabía exactamente dónde estaban los libros o determinada hoja de un manuscrito. Por tanto, pese al aparente desorden, también aquí tenemos sólo *una* situación concreta en la cual el profesor logra encontrar sus papeles. Cuando la mujer de la limpieza ordena el escritorio, crea en cambio una situación nueva, en la que el profesor ya no encuentra las cosas en «su» lugar. Por eso, el concepto de entropía incluye las siempre renovadas realizaciones de las distintas posibilidades que habíamos analizado en el caso de la distribución de las moléculas en la caja; en otras palabras, el escritorio del profesor está desordenado si los objetos cambian continuamente de sitio.

Del mismo modo procede la naturaleza con las moléculas de gas. Éstas (por ejemplo, las de oxígeno a temperatura ambiente) se desplazan a una velocidad de 460 metros por segundo, y, por tanto, se arremolinan constantemente ante nuestros ojos, dando lugar a distribuciones siempre cambiantes de las moléculas en las cajas. La naturaleza es como un jugador de naipes que peina la baraja a tal velocidad que no nos permite seguir los movimientos individuales. El propio movimiento con que cambian constantemente de lugar las moléculas es desordenado; es el movimiento térmico.

La energía cada vez vale menos

Estas conclusiones pueden formularse también de otra manera, como en el ejemplo del automóvil. Cuando éste está en movimiento, toda su energía está destinada al desplazamiento o, dicho de otra forma, toda su energía es cinética. Dado que su desplazamiento se produce en determinado sentido, el coche tiene —como dicen los físicos— un *grado de libertad.* Al frenarlo su energía cinética se transforma en calor; sus frenos y neumáticos se calientan (fig. 2.6).

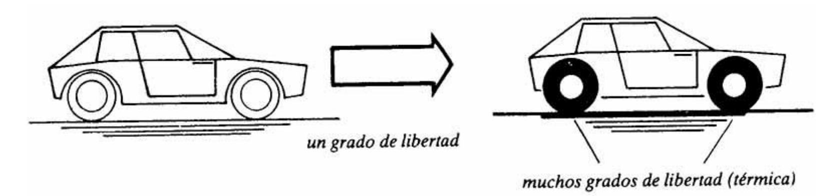


Fig. 2.6: el automóvil en marcha (izquierda) tiene un solo grado de libertad. Al frenar, este solo grado de libertad se transforma en los extremadamente numerosos grados de libertad del movimiento térmico de, por ejemplo, las ruedas y los frenos.

Ahora bien, el calor supone el movimiento microscópico de muchos átomos o moléculas. Como es sabido, un cuerpo está más caliente que otro cuando sus moléculas se mueven más intensamente que las de aquel más frío. Pero como las moléculas pueden moverse en distintas direcciones, al menos en el dominio microscópico, y como son muy numerosas, la energía térmica está repartida entre muchos grados de libertad. En otras palabras: al frenar el automóvil, la energía de un grado de libertad se divide en la energía de numerosos grados de libertad, y nuevamente se abren muchas, muchísimas posibilidades para estas distribuciones. El proceso inverso supondría que de pronto todas las moléculas se movieran, como cumpliendo una orden, en una sola dirección, y que los muchos grados de libertad volvieran a convertirse en uno solo. Pero según la ley fundamental de la termodinámica ello es imposible. Podemos transformar la energía de un grado de libertad, la energía cinética del automóvil, en calor, pero no podemos invertir este proceso, o al menos no de forma completa. Como pronto veremos, la energía concentrada en un grado de libertad tiene un valor superior que cuando está repartida en muchos grados de libertad.

Es posible poner determinados límites a la tendencia de la naturaleza a alcanzar un desorden cada vez mayor. Por ejemplo, podemos impedir que

las moléculas sigan distribuyéndose introduciendo un tabique de separación en un recipiente. Siempre debe tenerse presente que la naturaleza no tiene que alcanzar forzosamente el máximo desorden, y que se le pueden imponer barreras desde fuera. Con estos trucos, la técnica permite al hombre transformar una parte de la energía térmica en energía provechosa. En el motor de combustión interna, por ejemplo, esto se consigue haciendo mover el pistón. El movimiento térmico que se produce durante la combustión explosiva de la gasolina se transforma parcialmente en el único grado de libertad del movimiento del pistón, aunque la mayor parte de la energía térmica se pierde y se elimina a través del agua de refrigeración. Como demuestra la física, esta «recuperación» de una energía de alto valor es limitada, por principio, además de requerir máquinas inventadas y construidas por el hombre.

En el cosmos no parecen existir tales barreras capaces de impedir el aumento del desorden. Ello llevó a los físicos a la conclusión de que el universo tiende hacia una situación de máximo desorden, en la cual finalmente se desmoronan todos los estados de orden y la vida ya no es posible: el mundo muere de «muerte térmica». Citemos al famoso Hermann L.F. von Helmholtz (1821-1894): «A partir de ese momento el universo está condenado a un estado de eterna quietud.» El no menos famoso Rudolf J.E. Clausius (1822-1888) señaló que: «A medida que el universo se acerca a la situación límite de la entropía máxima, van disminuyendo progresivamente las posibilidades de ulteriores modificaciones.» Una vez alcanzado este estado, el universo se hallaría en un «estado de muerte irreversible».

Pero si esta visión del futuro del universo no parece señalarnos ninguna posibilidad de vida, tampoco nos la brinda la visión del pasado. En opinión de casi todos los físicos, el mundo nació hace unos diez mil millones de años de un «estallido original», en forma de enorme bola de fuego calentísima en la que no reinaba orden alguno. Por ende, también al comienzo del mundo tenemos el caos, y no el orden. Y a partir de entonces dicen, el desorden seguiría creciendo hasta hacerse máximo. ¿Qué cabida tienen aquí las estructuras ordenadas con un sentido, los seres vivientes en suma?

III. LOS CRISTALES: ESTRUCTURAS ORDENADAS, PERO MUERTAS

Acabamos de ver que una temperatura más elevada provoca un movimiento térmico más agitado de las moléculas y con ello un mayor desorden. Esto sugiere que quizá podría crearse un estado ordenado extrayendo energía térmica de un sistema. Así ocurre, en efecto, durante el proceso de enfriamiento. Observemos algunos hechos empíricos.

Cuando enfriamos agua, ésta se convierte en hielo o, mejor dicho, se forma un cristal de hielo (fig. 3.1). Como las moléculas de agua son pequeñísimas (su grosor es sólo aproximadamente una millonésima de milímetro), no podemos identificarlas ni siquiera con el mejor de los microscopios. Pero con rayos X u ondas electrónicas se pueden «palpar» los cristales con tanta exactitud que los físicos están en condiciones de dibujar una imagen muy exacta de su estructura. Según estas observaciones las moléculas de un cristal están rigurosamente alineadas; nos hallamos, por tanto, ante un estado muy ordenado, y a la vez rígido, de la materia. En el agua líquida, las moléculas pueden deslizarse unas sobre otras, lo cual posibilita la fluidez del agua. Si la calentamos, se evapora a la temperatura de ebullición y se transforma en vapor de agua. En éste, las moléculas de agua flotan desordenadamente, entrechocan cual miríadas de diminutas pelotas de tenis y al rebotar modifican sus trayectorias, dando lugar, por tanto, a un estado de completo desorden (fig. 3.2).

En física, estos estados de agregación —sólido, líquido, gaseoso— se llaman también fases, y el paso de una fase a otra, se denomina transición. Estas transiciones han fascinado a los físicos desde tiempos muy remotos, puesto que dan lugar a estados con grados de orden o desorden muy distintos y su investigación continúa hasta la fecha ¿Qué tienen de especial estas transiciones de una fase a otra?

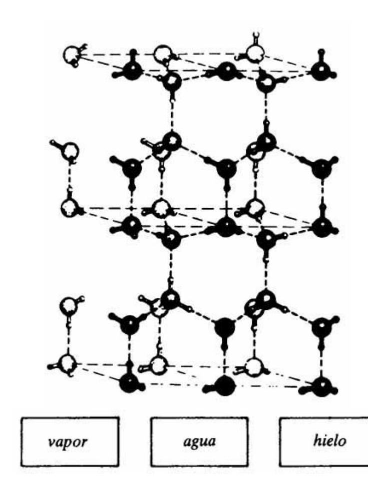


Fig. 3.1: en el cristal de hielo las moléculas de agua están ordenadas periódicamente en una red fija. Las esferas representan los átomos de oxígeno; los brazos que de ellas salen, los átomos de hidrógeno.

Fig. 3.2: los distintos estados físicos del agua.

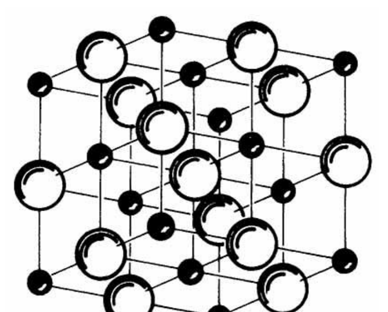


Fig. 3.3: ordenamiento de los átomos en un cristal de sal de cocina (NaCl). Esferas grandes: iones de cloro; esferas pequeñas: iones de sodio.

El ejemplo del agua ya evidencia que en las tres fases: vapor, agua y hielo, las moléculas son exactamente las mismas. Las fases sólo se distinguen microscópicamente por el ordenamiento de las moléculas. En el vapor, éstas se mueven caóticamente a gran velocidad (a unos 620 metros por segundo). Prácticamente no actúa ninguna fuerza entre las moléculas, salvo cuando chocan entre sí. En el estado líquido, los átomos se aproximan mucho y están sometidos a fuerzas de atracción pero las moléculas todavía pueden deslizarse unas sobre otras. En el cristal, en cambio, las moléculas están ordenadas en una «red» estrictamente periódica (fig. 3.3).

A estos diversos estados de orden microscópico van ligadas propiedades macroscópicas totalmente distintas, entre las que destacan las propiedades mecánicas. Un gas (o vapor de agua), por ejemplo, se deja comprimir muy bien, el agua, apenas, y el hielo es un cuerpo sólido. También cambian otras propiedades físicas de naturaleza macroscópica, como por ejemplo la transparencia. Estos ejemplos nos muestran que cambios microscópicos pueden dar origen a propiedades macroscópicas totalmente nuevas de las sustancias, y no sólo del agua.

Debemos destacar otra propiedad de estas transiciones de fase: si las demás condiciones (la presión, por ejemplo) no varían las transiciones se producen a una determinada temperatura que se llama temperatura crítica, como la ebullición del agua a 100°C y su congelación a 0°C (por lo demás, la escala Celsius se estableció precisamente de manera que a estas temperaturas correspondieran los números 100 y 0, respectivamente). Otras sustancias se funden a temperaturas completamente distintas; el hierro, por ejemplo, a 2.081°C, y el oro, a 1.611°C, y se evaporan a temperaturas correspondientemente más altas.

Hiperconducción y magnetismo. El orden en lo microscópico refuerza lo macroscópico

Estas transiciones de fase no ocurren únicamente entre distintos estados de agregación. Un mismo cristal puede presentar otras características que pueden cambiar súbitamente. Otro fenómeno también muy interesante para aplicaciones técnicas es la hiperconducción. Para comprender qué tiene de extraordinario, recordemos la conducción de la corriente a través de líneas eléctricas, ya sean de la red interurbana o de la radio. En la conducción de la corriente a través de un metal ésta es transportada por las partículas eléctricas más pequeñas, los electrones. Los metales suelen formar una red cristalina, entre la cual se mueven como un gas los electrones. Pero al chocar con los átomos de la red, pierden energía (fig. 3.4). En otras palabras, rozan la red cristalina y ceden una parte de su energía, que se transforma en un desordenado movimiento térmico de los átomos de la red cristalina. Así se produce una continua pérdida de energía eléctrica en forma de energía térmica. En el caso de la plancha eléctrica se trata precisamente del efecto deseado, pero no así en la red interurbana, por ejemplo; el consumidor

quiere obtener la corriente con toda la fuerza con la que sale de la central eléctrica y no calentar las líneas. Pero lamentablemente el rozamiento antes descrito, llamado resistencia eléctrica, implica sustanciales pérdidas de energía.

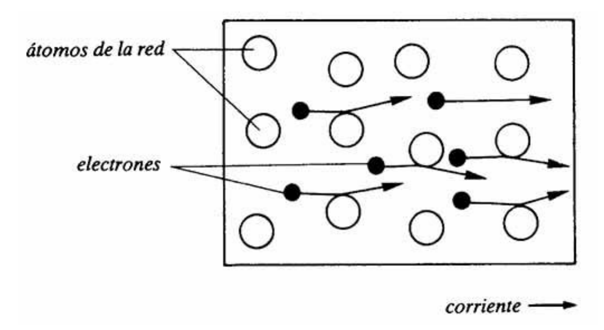


Fig. 3.4: este esquema muestra una sección microscópica de una red metálica. Los círculos blancos representan los átomos del cristal, que vibran constantemente a raíz del movimiento térmico. Los electrones, representados por pequeños círculos negros, chocan con estos átomos vibrantes; estos choques los desvían de su trayectoria y los frenan. En parte entregan así su energía a los átomos del metal, con lo cual éste se calienta. A la vez se reduce la corriente de los electrones.

El físico holandés Kammerlingh Onnes descubrió ya en 1911 que ciertos metales, como el mercurio, pierden por completo su resistencia cuando se enfrían por debajo de determinada temperatura muy baja (fig. 3.5), un fenómeno que llamó *hiperconducción.* Lo asombroso de este fenómeno es que sucede algo totalmente nuevo: la resistencia no se hace muy pequeña, sino que a todas luces desaparece por completo. Así lo demostraron experimentos en los que se dobló un alambre en un circuito cerrado que la corriente atravesó durante más de un año sin ningún síntoma de fatiga. Quienes se fatigaron fueron los físicos, que terminaron el experimento calentando otra vez el alambre. La explicación teórica de este fenómeno se hizo esperar más de cuarenta años. Hoy sabemos que el fenómeno de la hiperconducción se basa en un estado de orden microscópico muy especial, en el cual los electrones de un metal recorren el cristal agrupados de dos en dos. Estos pares se unen en un movimiento estrictamente ordenado capaz de contrarrestar los intentos de resistencia de los átomos del cristal. Es

como si un grupo de soldados atravesara un matorral corriendo de dos en dos cogidos del brazo. El matorral ya no puede desviar de su camino a los soldados individuales. Una vez más, igual que en otras transiciones, un nuevo orden microscópico (el «correr en pareja») implica un estado macroscópico completamente nuevo (el flujo sin trabas de la corriente).

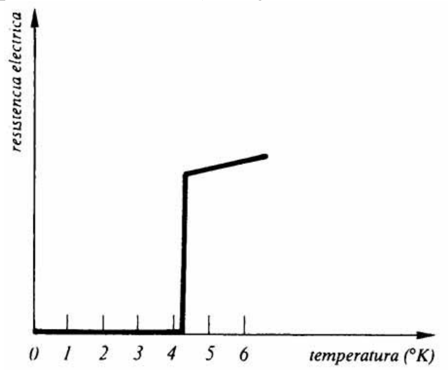


Fig. 3.5: en esta gráfica el eje horizontal indica la temperatura; el vertical, la resistencia eléctrica. Por debajo de cierta temperatura «crítica» (aquí, 4,2°K [temperatura absoluta]) la resistencia eléctrica desaparece por completo; por encima de esta temperatura la resistencia toma un valor finito.

¿Por qué no se emplean entonces hiperconductores en la red interurbana? La dificultad estriba en que la hiperconducción se produce sólo a temperaturas muy bajas (de –260 °C por ejemplo) y la refrigeración de los cables resultaría muy cara. Pero existen otras aplicaciones, muy importantes, en las que la refrigeración es rentable. Como sabemos, las corrientes eléctricas pueden generar campos magnéticos. La hiperconducción ha permitido generar campos magnéticos enormemente fuertes, que ya se están usando en las máquinas destinadas a generar energía solar por fusión nuclear en la Tierra, por ejemplo: con minihiperconductores se pueden construir elementos de conexión para computadoras: la próxima generación de computadoras constará de cerebros electrónicos que sólo podrán trabajar en cámaras frigoríficas a muy baja temperatura, cerca del cero absoluto.

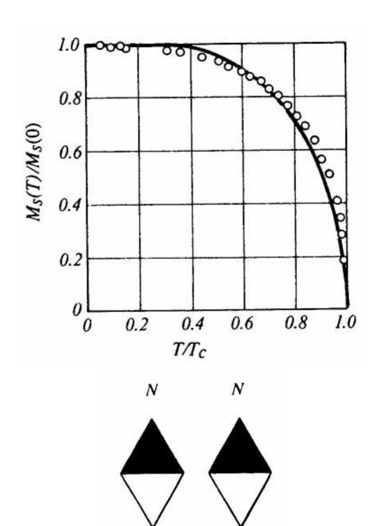


Fig. 3.6: el eje horizontal indica la temperatura; el vertical, la magnitud de la imanación de un ferroimán. Por encima de determinada temperatura $T = T_c$ la imanación desaparece; es decir, el ferroimán de pronto se vuelve no magnético.

Fig. 3.7: los microscópicos imancillos elementales del ferroimán intentan colocarse paralelos entre sí, con coincidencia de sus polos norte y sur.

Otro ejemplo de cambio drástico y repentino de una propiedad física lo brinda el imán de hierro. Los cristales de hierro, que a temperatura ambiente son magnéticos, pierden súbitamente su magnetismo cuando se les calienta a 774°C (fig. 3.6). También en este caso es interesante la explicación microscópica. A través de progresivas divisiones del imán, los físicos constataron que éste estaba formado por imancillos cada vez más pequeños, los menores de los cuales eran los propios átomos de hierro (más exactamente, sus electrones). Estos «imanes elementales» actúan unos sobre otros; pero mientras que los polos magnéticos iguales normalmente se repelen, los imanes elementales tienen la propiedad inversa: los polos iguales se atraen. Dicho en otros términos, físicamente más exactos, los imanes elementales quieren orientarse todos en la misma dirección (fig. 3.7). La explicación de este comportamiento extraño, dicho sea de paso, sólo fue posible gracias a la teoría cuántica, a través de los trabajos de Heisenberg, pero una explicación detallada nos alejaría demasiado del tema central. Todos los campos magnéticos microscópicos se suman y generan así un campo magnético macroscópico, que es el que conocemos en el caso del imán de hierro.

Transiciones de fase: del desorden al orden o viceversa

En el estado desordenado del imán de hierro, los imanes elementales pueden apuntar en todas las direcciones posibles. Nos hallamos ante lo que se denomina una situación simétrica: no existe ninguna dirección preferente. En cambio, cuando el estado total es magnético, todos los imanes elementales apuntan repentinamente en una dirección concreta. Pese a que antes de la transición todas las direcciones eran equivalentes, ahora se escoge una dirección muy determinada, «rompiendo» la simetría original de las direcciones (fig. 3.8).

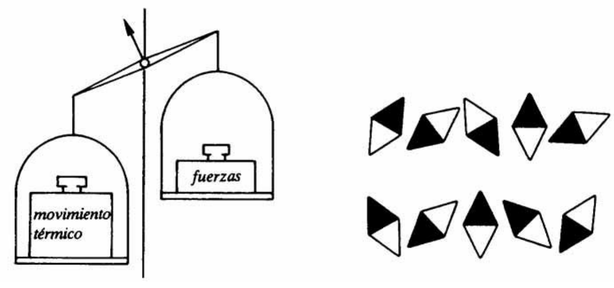


Fig. 3.8: la balanza simboliza la lucha competidora entre el movimiento térmico y las fuerzas que quieren alinear paralelos los imanes elementales. Si prevalece el movimiento térmico apuntan hacia las más diversas direcciones.

El imán de hierro permite estudiar con especial claridad una transición en el nivel microscópico. En la fase magnética, ordenada, todos los imanes elementales están alineados, mientras que en la fase desordenada apuntan hacia las más diversa direcciones. La causa de estas dos fases completamente distintas es la competencia de dos fuerzas físicas de muy distinta naturaleza. Uno de los tipos de fuerzas que actúan entre los imanes elementales determina una alineación paralela de los imancillos. El otro tipo de fuerzas se basa en el movimiento térmico. El calor significa precisamente movimiento desordenado. Luego el movimiento térmico intenta empujar incesantemente a los imancillos elementales en las más diversas direcciones. Podemos imaginarnos ahora una balanza: en uno de los platillos tenemos la pesa que simboliza el movimiento térmico, y en el otro, la que simboliza las fuerzas de la alineación paralela. Cuando «pesa» más el movimiento térmico, la balanza se inclina hacia ese lado, es decir que en el imán

de hierro prevalece el movimiento desordenado (fig. 3.9). Los efectos externos de los imancillos individuales se anulan mutuamente y no observamos una imantación macroscópica. Pero si quitamos energía térmica a la barra de hierro, es decir, si aligeramos este platillo de la balanza, prevalecen las fuerzas que actúan entre los imanes elementales. La balanza se inclinará de pronto hacia el otro lado: todos los imanes elementales se alinean (fig. 3.10).

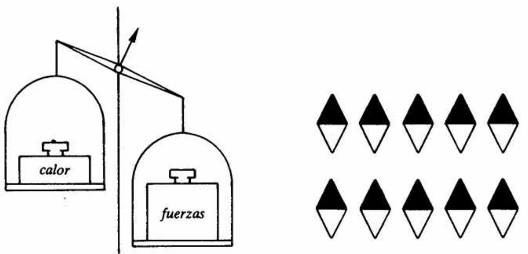


Fig. 3.9: lo mismo que la figura 3.8, pero ahora el movimiento térmico se ha debilitado. Prevalecen las fuerzas y alinean paralelos los imancillos elementales.

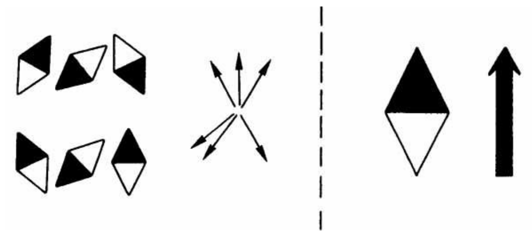


Fig. 3.10: resumen de los casos de las figuras 3.8 y 3.9.
Izquierda: si los imanes señalan en distintas direcciones, sus efectos magnéticos hacia fuera se anulan mutuamente, es decir, su imanación es igual a cero.
Derecha: si todos los imanes elementales apuntan en la misma dirección, se refuerzan en su magnetismo hacia fuera. Se produce entonces una imantación fuerte; es decir, el ferroimán será magnético.

Algunos conceptos que ya se nos presentan en las transiciones de fase resultarán importantes no sólo para los procesos físicos, sino también, por ejemplo, para los sociológicos y psicológicos, que observaremos más adelante desde el punto de vista de la sinergética.

Una de estas cualidades importantes de muchas transiciones puede observarse a simple vista cuando hierve un líquido. El agua, por ejemplo, es transparente por debajo del punto de ebullición y también por encima de ese punto, en la fase de vapor. Si la calentamos con cuidado, de modo que vaya acercándose lentamente al punto de ebullición, veremos que se vuelve opaca, lechosa, turbia, porque la luz se dispersa mucho. Esta dispersión se debe, a su vez, al hecho de que el movimiento de las moléculas se intensifica especialmente cerca del punto de transición. Aparecen «fluctuaciones críticas», como dicen los físicos. Para dar una imagen plástica: es como al final de una concentración en una plaza pública. De pronto, la multitud se dispersa, aparece un movimiento intenso, se forman áreas de mayor y menor densidad, hasta que finalmente cada persona sigue su propio camino (fig. 3.11). Como ya hemos señalado, las transiciones de fase siguen siendo objeto de una intensa investigación física. En los últimos años se ha comprobado con sorpresa que estas transiciones, pese al carácter diverso de las sustancias y los fenómenos, obedecen a las mismas leyes y presentan siempre los mismos fenómenos fundamentales, como por ejemplo las fluctuaciones críticas o la ruptura de la simetría.

Últimamente la física ha logrado fundamentar las normas unitarias. La súbita aparición de estructuras ordenadas en las transiciones de fase podría inducirnos fácilmente a extrapolar directamente estas observaciones a fenómenos vitales, puesto que también éstos presentan, en cierto sentido, sistemas ordenados. Sin embargo, a ello se oponen objeciones de mucho peso. En los ejemplos estudiados hasta aquí las sustancias sólo adoptan su estado ordenado cuando baja la temperatura. Los fenómenos vitales en cambio decaen al bajar la temperatura, llegando incluso a la parálisis total y hasta la muerte, en el caso de muchos seres vivientes.

Los seres vivos se mantienen con vida a través de un incesante flujo de energía y materia que asimilan y transforman. Además precisamente los más evolucionados entre ellos, esto es, los animales de sangre caliente, no se hallan en absoluto en equilibrio térmico con su medio. Más bien están muy lejos de ello: la temperatura de nuestro cuerpo es de 37°C; la de una habitación, de unos 20°C. Es evidente que los fenómenos vitales deben basarse en principios totalmente diferentes, que nada tienen que ver con los procesos seguidos por los cristales en la hiperconducción o en el ferromagnetismo. Aparentemente, la física nada puede aportar a la explicación de la

vida. Pero no nos precipitemos y examinemos primero los siguientes capítulos.

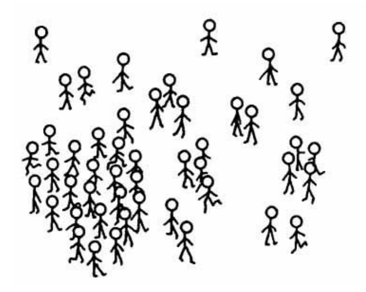


Fig. 3.11: al disolverse una concentración aparecen fuertes fluctuaciones en la distribución de la densidad de los participantes.

IV. DIBUJOS DE LÍQUIDOS Y DE NUBES Y FORMACIONES GEOLÓGICAS

Como es sabido, la mecánica describe distintos tipos de equilibrio (figs. 4.1-4.3). Imaginemos una bola en un cuenco de vidrio boca arriba: la bola permanece en reposo en el punto más bajo del cuenco. Si la movemos un poco, de inmediato regresa a su posición de equilibrio. Su equilibrio es estable. Si por el contrario movemos una bola sobre un tablero horizontal, ésta se quedará en reposo en su nueva posición. Es el llamado equilibrio indiferente. Si, por último, logramos colocar la bola en el punto más alto de un cuenco de vidrio invertido abajo, la bola estará nuevamente en equilibrio, pero por poco que la desplacemos se alejará cada vez más de la cima. Su equilibrio es inestable.

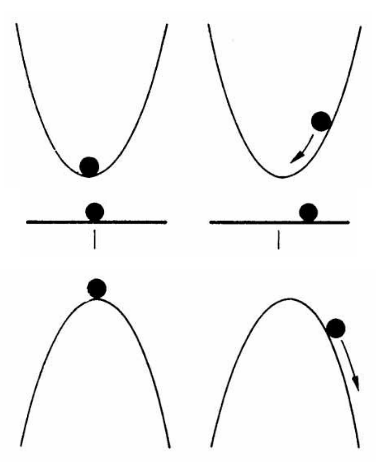


Fig. 4.1: la bola colocada en un vidrio de reloj boca arriba está en equilibrio estable.

Fig. 4.2: sobre una base horizontal la bola está en equilibrio indiferente.

Fig. 4.3: sobre un vidrio de reloj colocado boca abajo la bola está en equilibrio inestable.

Ahora emplearemos estos conceptos sencillos para llegar a comprender mejor algunos fenómenos muy interesantes del movimiento de los líquidos. Se trata de hechos conocidos por todos, pero de los que rara vez tomamos conciencia. A veces vemos en el cielo «calles» de nubes, pasos de nubes estrictamente ordenadas (fig. 4.4). Como saben los pilotos de planeadores, no se trata de formaciones estáticas, sino de masas de aire en movimiento:

el aire sube a lo largo de una banda y baja a lo largo de la siguiente, moviéndose por tanto, en forma de rollos. Estos movimientos se pueden generar a pequeña escala en el laboratorio, empleando un líquido en vez de aire. Al calentar por debajo una capa de líquido ocurre lo siguiente (fig. 4.5): mientras la diferencia de temperatura entre la parte superior y la inferior sea pequeña, el líquido no se moverá macroscópicamente hablando. Evidentemente el líquido intenta nivelar las diferencias de temperatura mediante el transporte de calor, pero como sabemos, el calor es un movimiento microscópico invisible.



Fig. 4.4: calles de nubes

A medida que aumenta la diferencia de temperaturas ocurre algo sorprendente. El líquido inicia un movimiento macroscópico, y no en agitado desorden, sino formando ordenados rollos (fig. 4.6). El líquido va ascendiendo en franjas longitudinales, se enfría en la superficie y vuelve a descender. Lo sorprendente en la formación de estos rollos consiste en que las moléculas de líquido tienen que «ponerse de acuerdo», a través de distancias para ellas enormes, para llegar a producir un movimiento colectivo. Los rollos de líquido son miles de millones de veces mayores que las propias moléculas. Observemos primero una capa de líquido en reposo. Cuando se calientan sus capas inferiores, estas naturalmente se dilatan y quieren subir a la superficie. El líquido más frío y por tanto más pesado ejerce una presión de arriba hacia abajo. Pero el líquido que tiende hacia arriba y el que tiende hacia abajo se mantienen en equilibrio (fig. 4.7). ¿Se trata de un equilibrio estable o lábil, inestable? A primera vista podría parecer que la situación es inestable, puesto que el líquido de arriba tiende a bajar y el de abajo a subir de modo que bastaría un pequeño empujón para

ponerlo en movimiento. Pero la situación es un poco más compleja, como en seguida veremos.

Imaginemos que asciende una pequeña esfera de líquido calentado (fig. 4.8). Al entrar en contacto con las capas más frías, la esferita perderá calor. Se enfriará, se contraerá y perderá su tendencia a querer ascender. Además, el rozamiento de su entorno va frenando el movimiento ascendente. Por consiguiente, el enfriamiento y el frenado impiden que la esfera de líquido siga subiendo, por lo cual la capa de líquido tiene que permanecer en reposo. Pero esta situación no puede mantenerse cuando las diferencias de temperatura son muy grandes. En efecto si el líquido se calienta lo suficiente, la gotita de líquido caliente sí que puede subir y originar un movimiento macroscópico. Ahora bien, lo sorprendente es que estas gotitas calientes no suben de manera irregular, sino homogéneamente ordenadas, como bajo la acción de una fuerza exterior.

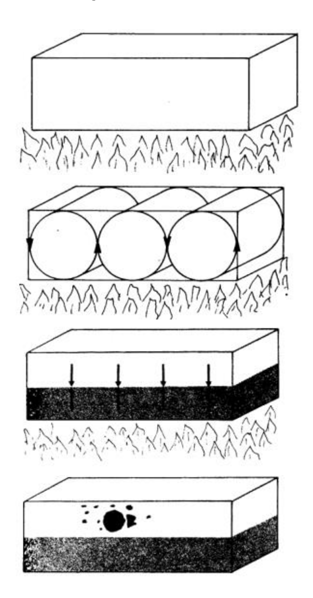


Fig. 4.5: líquido calentado por sus capas inferiores.

Fig. 4.6: movimiento en forma de rollos del líquido.

Fig. 4.7: el líquido aún se halla en reposo.

Fig. 4.8: una esfera de líquido en ascenso.

Lo comprenderemos fácilmente trazando una analogía. Pensemos en una piscina en la que los nadadores tengan que nadar hasta un extremo y luego volver. Si hay mucha gente en la piscina, como suele ocurrir los días

calurosos del verano, habrá muchos nadadores en movimiento, que se estorbarán en sus idas y venidas (fig. 4.9). Por eso, a algunos bañeros se les ocurre hacer nadar a los bañistas en círculo (fig. 4.10), con lo cual la natación es mucho más fluida. El bañero ha impuesto a los nadadores un movimiento colectivo. Sin embargo, los nadadores también podrían adoptarlo por propia iniciativa. Al principio tal vez serían solo unos pocos, pero luego irían sumándoseles cada vez más, porque también a ellos les resultaría más cómodo nadar en círculo. Así surgiría finalmente un movimiento colectivo no impuesto desde fuera sino *autoorganizado.* La naturaleza, es decir, el líquido, procede de igual manera. Descubre que puede transportar mucho mejor sus partes calientes hacia arriba si éstas se acoplan en un movimiento regular.

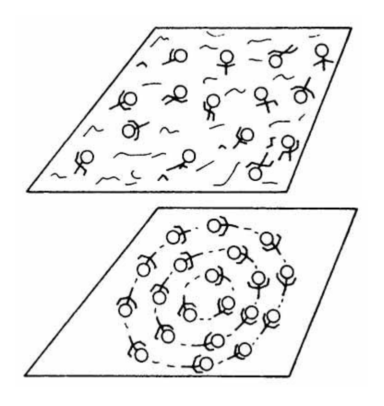


Fig. 4.9: nadadores en una piscina. Movimiento no ordenado.

Fig. 4.10: nadadores en una piscina. Movimiento circular, ordenado.

Pero, ¿cuál es el proceso pormenorizado? El líquido procede por fluctuaciones; vale decir que prueba constantemente diversas posibilidades de movimiento, enviando sin cesar pequeñas porciones de líquido caliente hacia arriba, a título de prueba como si dijéramos, y haciendo descender en cambio porciones más frías. Podemos descomponer mentalmente las más diversas posibilidades de movimiento en movimientos muy simples: el movimiento supuestamente caótico de un líquido puede descomponerse en formas de movimiento de apariencia regular. En las figuras 4.11 y 4.12 se representan dos formas de movimiento. En una de ellas el líquido descubre que las condiciones son especialmente propicias para el asiento de las porciones calientes. Esta forma de movimiento va en aumento, incorporando

cada vez más partes del líquido, que se ven «esclavizadas» por él. Pasado cierto tiempo, la otra forma de movimiento comienza a decrecer; no era más que una suerte de fluctuación.

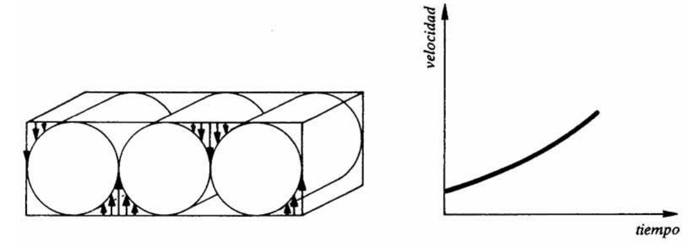


Fig. 4.11: a la izquierda, una posibilidad de disposición de los rollos de movimiento. A la derecha: en el curso del tiempo (eje horizontal) la velocidad de los rollos (eje vertical) crece cada vez más.

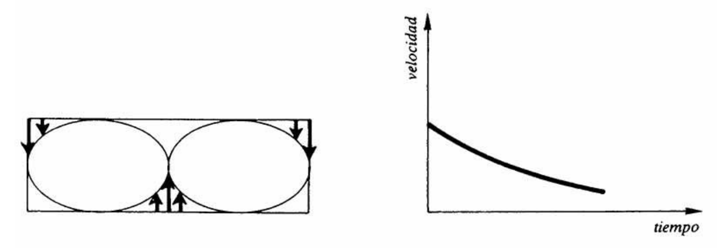


Fig. 4.12: otra configuración de los rollos, cuya velocidad de rotación va disminuyendo con el tiempo.

Nos encontramos aquí con el comportamiento competitivo de diversas formas de movimiento colectivo: una de las formas va imponiéndose y somete a las demás. Nace un movimiento giratorio determinado del líquido. Este movimiento desempeña un papel de «ordenador». Señala cómo deben moverse las distintas partes del líquido. Una vez establecida una forma de movimiento, aunque sólo sea en sectores parciales del líquido, también el resto se verá arrastrado a esa forma de movimiento o, en otros términos, también será esclavizado por el ordenador.

Es interesante poder calcular exactamente cuál de los movimientos colectivos acabará por triunfar y a cuáles otros esclavizará. Con todo, eso sólo

es válido *cum grano salís.* Pues si observamos un rollo aislado, por ejemplo, el del medio, queda claro que en principio el movimiento podrá darse tanto en el sentido de las agujas del reloj como en sentido contrario (figs. 4.13/14). El sentido de giro finalmente elegido depende de factores casuales. La simetría de los movimientos en uno u otro sentido queda rota por una fluctuación inicial casual. Una vez que el estado inicial de reposo del líquido se vuelve inestable, bastará un pequeño fenómeno de fluctuación para desencadenar el movimiento giratorio. Este fenómeno también basta para fijar los movimientos macroscópicos. Cuando estudiemos la sociología veremos que en las decisiones políticas o económicas a menudo pequeñas fluctuaciones, producto casi del azar, llevan a optar por determinada dirección cargada de consecuencias. Una vez realizada la elección, la otra opción queda excluida y ya no puede volverse atrás. Muchas veces unas fluctuaciones mínimas deciden qué opción se elige. Luego, quiéranlo o no, todas las partículas tienen que participar en ese movimiento.

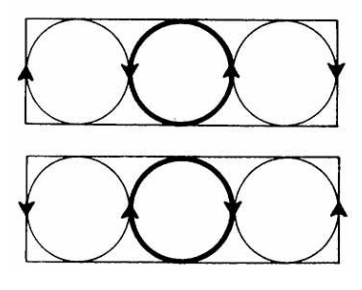


Fig. 4.13: para ilustrar la ruptura de la simetría. En este caso el rollo central gira en contra de las agujas del reloj.

Fig. 4.14: igual que en la figura 4.13, pero ahora el rollo central gira en el sentido de las agujas del reloj; correspondientemente, los otros rollos giran en sentido inverso.

Al comienzo de este capítulo se han explicado los distintos tipos de equilibrio con un sencillo modelo mecánico, a saber, una bola y un cuenco. Este modelo también permite comprender la estabilización de los «rollos». Hacia la derecha del eje (figs. 4.15/18) dibujaremos la máxima velocidad vertical. Por tanto, representamos la magnitud de la velocidad a través de la desviación de una esfera. Si el estado de reposo del líquido es estable, todas las fluctuaciones de esta velocidad tendrán que tender hacia cero. Será el caso de la figura 4.15. Si vamos calentando el líquido desde abajo, el estado de reposo deviene inestable. Con una pequeña fluctuación crecerá la velocidad vertical.

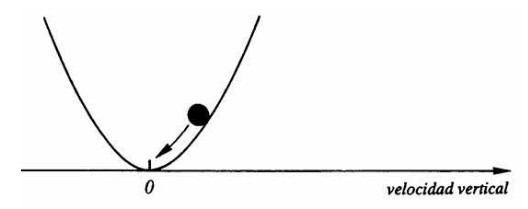


Fig. 4.15: este gráfico ilustra la situación de equilibrio del líquido cuando el calentamiento desde abajo es débil. Hacia la derecha se representa la velocidad vertical del líquido. Tras una perturbación la esfera, cuya posición simboliza la velocidad vertical, vuelve al estado de reposo.

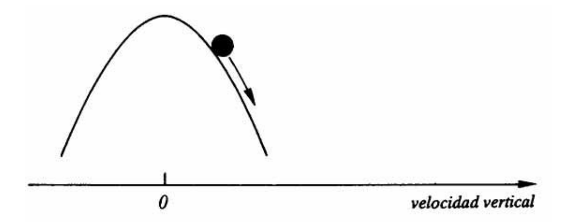


Fig. 4.16: si la diferencia de temperaturas entre el borde superior y el inferior del líquido es suficientemente grande, aumenta la velocidad vertical de los rollos. En nuestro símil mecánico esto significa que la situación de la esfera será inestable.

Podemos ilustrar la nueva situación, como ya hacíamos al principio del capítulo, mediante la fig. 4.16. Pero como los «rollos» finalmente se estabilizan, la velocidad no podrá seguir aumentando sino que alcanzará un valor finito estable. La esfera se encuentra nuevamente en un cuenco boca arriba. Componiendo las figuras obtenemos la 4.17. Pero dado que los dos sentidos de giro son equivalentes, nuestra representación tiene que ser simétrica, es decir que para la velocidad, simbolizada por la posición de la esfera, rige la fig. 4.18. Esto nos permite volver a examinar el concepto de ruptura de la simetría antes expuesto desde otra perspectiva. En principio la esfera, cuya posición simboliza la velocidad de los «rollos», puede adoptar dos posiciones equivalentes, pero evidentemente tendrá que decidirse por una de ambas, rompiendo así la simetría.

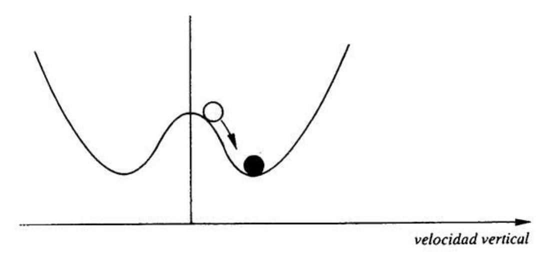


Fig. 4.17: dado que la velocidad vertical no crece discrecionalmente sino que al final se llega al reposo, la situación inestable de la esfera de la fig. 4.16 tiene que desembocar finalmente en una situación estable, que es lo que representa nuestro gráfico.

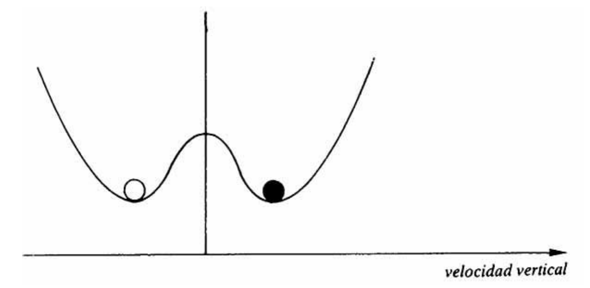


Fig. 4.18: ejemplo gráfico de la ruptura de la simetría. La esfera puede adoptar una de dos posiciones completamente equivalentes. En el caso de los rollos esto significa que pueden girar tanto en el sentido de las agujas del reloj como en el contrario.

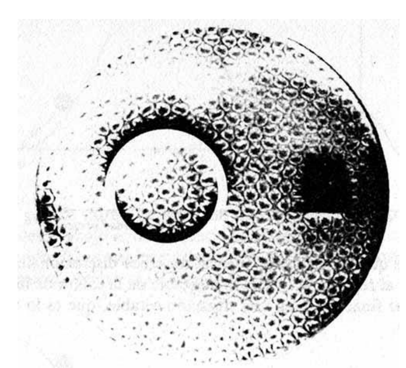


Fig. 4.19: dibujo de panales de abejas en el movimiento de un líquido. El líquido sube por el centro de cada alvéolo y desciende por sus contornos.

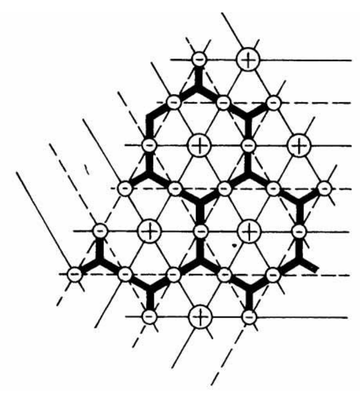


Fig. 4.20: este esquema muestra cómo se forma el dibujo de alvéolos hexagonales de la figura 4.19 por superposición de rollos de distinta orientación.
En los círculos con signo positivo, el líquido asciende, y desciende en los de signo negativo. Las líneas continuas y de trazos indican los bordes de los rollos. En las líneas continuas el líquido sube; en las de trazos, baja. Las líneas gruesas indican los hexágonos formados, en los que el líquido se mueve hacia abajo.

Los movimientos giratorios no son los únicos movimientos macroscópicos posibles en líquidos calentados por debajo. Si el líquido se encuentra en un recipiente circular, por ejemplo, la dirección del eje del «rollo» es aún completamente discrecional. En este caso no sólo puede establecerse una competencia entre «rollos» distintos, en la que finalmente triunfe un solo sentido de rotación de los «rollos», sino que también pueden estabilizarse mutuamente movimientos giratorios de distinto sentido. El ejemplo más conocido se ilustra en la fig. 4.19. Aquí, los movimientos giratorios se apoyan y estabilizan mutuamente, tal como lo harían tres barras que se sustentaran entre ellas impidiendo su caída (fig. 4.20). Si se suman los distintos movimientos de los «rollos», lo cual es un poco laborioso, se obtiene finalmente un dibujo en forma de panal de abejas, es decir, de hexágonos. El líquido asciende por el centro de estos alvéolos y desciende luego por los bordes de los mismos. Este tipo de dibujo se obtiene al calentar, por ejemplo, una lata cilíndrica de cera para esquíes.

Este ejemplo ya nos muestra que el concepto de líquido abarca un campo muy amplio. En efecto, podemos encontrarnos, por ejemplo, con

lava volcánica, que termina por solidificarse y convertirse en bloques hexagonales. En los saladares que reciban el calor del interior de la tierra pueden llegar a cristalizar placas de sal más o menos nítidamente hexagonales. Si en ellas se forman cultivos bacterianos de color rojo, el resultado serán formaciones como la reproducida en la figura 4.21.

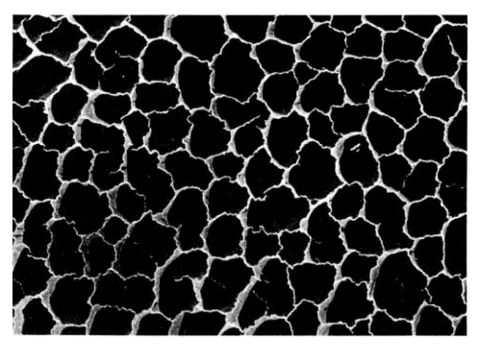


Fig. 4.21: sedimentaciones salinas hexagonales. Bacterias purpúreas colorean el fondo de un lago de sosa desecado en el África oriental.

En la superficie del sol, los astrónomos observan unas estructuras llamadas gránulos, que se supone tienen un origen en el fenómeno que acabamos de describir (fig. 4.22).

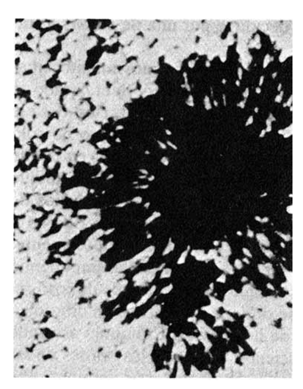


Fig. 4.22: gránulos en el sol.

Al calentar aún más las capas inferiores de un líquido en el que se ha formado un dibujo de panal de abejas, este dibujo puede verse nuevamente desplazado por «rollos» simples: en vez de la figura 4.19 se forma la 4.6. El análisis matemático de este fenómeno, que naturalmente no podemos reproducir aquí, permite una interpretación en parte divertida, en parte llamativa, puesto que en las nuevas condiciones se establece una lucha competitiva entre las tres direcciones de giro originales, que se habían estabilizado mutuamente para formar la estructura de panal. De nuevo será una fluctuación casual la que hará ganar esta lucha a uno de los «rollos», el cual asumirá entonces la conducción y esclavizará a los otros «rollos», es decir, someterá el movimiento de éstos al suyo.

Como puede verse en este tipo de descripciones la explicación de fenómenos naturales se confunde con la de otros que desempeñan un papel importante en la psicología o la sociología. Sin embargo la ventaja de los procesos naturales de los que hemos hablado hasta aquí está en que podemos calcularlos matemáticamente y seguirlos en detalle.

A lo largo del libro, seguiremos ofreciendo múltiples ejemplos de procesos naturales muy diversos, que asombrosamente se hallan sometidos a las mismas leyes.

Sin embargo, nuestros conocimientos nos permiten fijar ya el principio fundamental: si modificamos ciertas condiciones exteriores, como la diferencia de temperatura entre la parte superior y la inferior de un líquido, el estado original —de reposo— se vuelve inestable y es sustituido por un estado macroscópico nuevo. Cerca del punto de transición, el sistema ensaya, mediante continuas fluctuaciones, nuevas posibilidades de alcanzar un estado macroscópico ordenado. En el propio punto de inestabilidad y un poco por encima del mismo, la nueva forma de movimiento colectivo va intensificándose hasta que termina por imponerse a todos los demás movimientos colectivos. La relación entre los movimientos no tiene que ser siempre forzosamente competitiva: si éstos son equivalentes también pueden llegar a cooperar, lo cual dará origen a otros dibujos. Pero, a diferencia de las transiciones de fase en condiciones de equilibrio térmico los dibujos que aquí se formarán serán siempre resultado de un movimiento: estaremos siempre en presencia de una dinámica. En la génesis de las estructuras puede colaborar la forma del recipiente. Si su borde es rectangular, por

ejemplo, podrán coexistir dos formas de «rollos» perpendiculares entre sí, dando origen al dibujo de la figura 4.23.

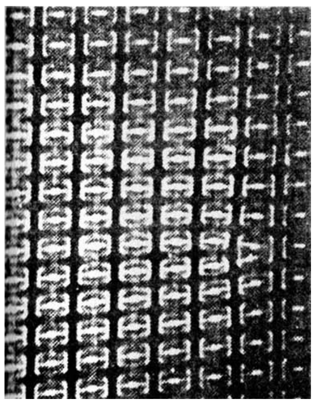


Fig. 4.23: vista de la superficie de un líquido calentado por sus capas inferiores, en la que se forman dos movimientos giratorios perpendiculares entre sí.

Existen dibujos aún más complejos, como el de la figura 4.24. Estos ya no son estáticos, sino que se encuentran en constante movimiento, como puede observarse a simple vista. Muestran pulsaciones en el movimiento del líquido, como si éste respirara.

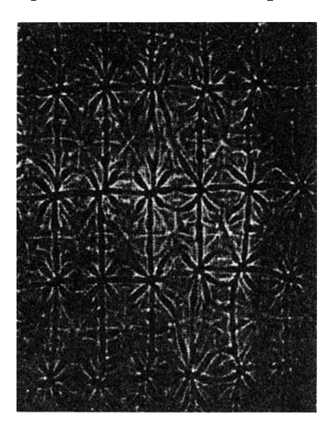


Fig. 4.24: vista de la superficie de un líquido calentado por sus capas inferiores, en la que se ha formado un complicado dibujo de movimiento que parece casi un dibujo de alfombra.

Graduación de los dibujos trazados por los movimientos

En los líquidos, los dibujos de movimientos no se producen sólo por calentamiento.

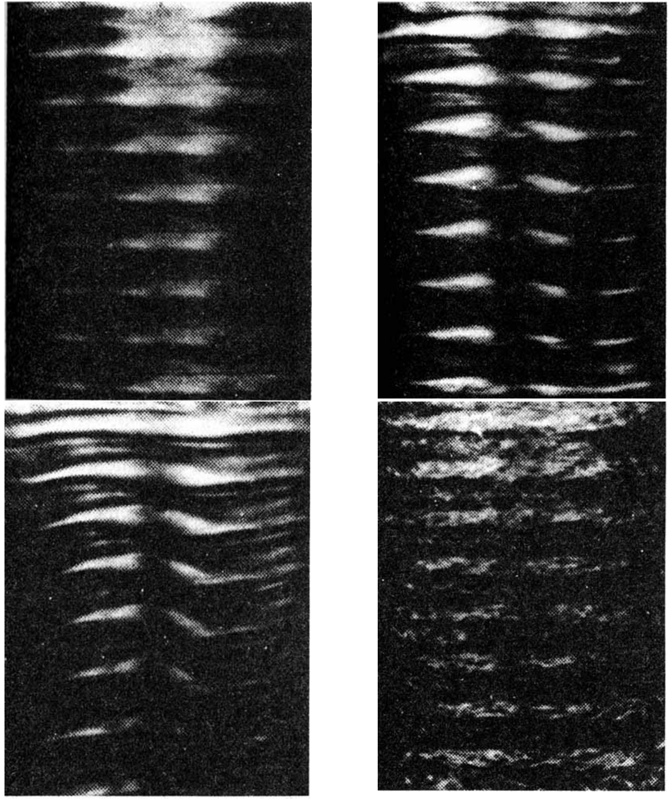


Fig. 4.25: movimiento de líquidos entre dos cilindros verticales coaxiales. El cilindro exterior, en reposo, es transparente; el cilindro interior rota. Según la velocidad de rotación del cilindro interior se forman distintos dibujos de líquidos.
a) rollos acostados en forma de salchichas alrededor del cilindro interior;
b) los rollos se balancean;
c) el movimiento se hace aún más complejo;
d) movimiento irregular, caótico.

Es bastante sencillo realizar la siguiente experiencia en un laboratorio: colocamos un líquido entre dos cilindros que tienen un eje central común y hacemos girar el cilindro interior. Naturalmente, este cilindro arrastra el líquido más próximo a él, mientras que el situado más cerca del cilindro exterior todavía sigue «pegado» a éste. A baja velocidad de rotación del cilindro interior se forman líneas de corriente concéntricas. Pero si el cilindro interior supera determinada velocidad crítica se inicia un movimiento totalmente distinto, en forma de «rollos», como los reproducidos en la figura 4.25a. Estos «rollos» parecen salchichas *frankfurt* comprimidas en una lata. Si seguimos aumentando la velocidad de rotación los «rollos» comienzan a oscilar. Se forman ondas (fig. 4.25b). A una velocidad aún más alta, estas oscilaciones se hacen más complejas hasta que, a la velocidad más elevada, pasan a constituir un movimiento completamente irregular. Este movimiento se llama turbulencia o, más recientemente, caos (fig. 4.25d).

Este ejemplo de movimientos de un líquido muestra que, a través de la autoorganización, los movimientos pueden formar dibujos cada vez más complejos. En términos sinergéticos, aparecen sucesivamente nuevos ordenadores.

La aparición de un movimiento totalmente irregular y caótico podría hacer suponer que los ordenadores han perdido aquí el control. La respuesta en el capítulo 11.

La importancia de este ejemplo reside en que muestra que en condiciones experimentales muy concretas también puede originarse un movimiento caótico en fenómenos que se autoorganizan. En los últimos años la investigación de tales movimientos caóticos ha cobrado un gran impulso. Hay modelos matemáticos que demuestran que estos fenómenos pueden ser de aparición forzosa y no sólo en física, sino también en campos muy distintos, como por ejemplo en la economía. Ello nos llevará a reconocer que debemos romper con ciertos dogmas de la teoría económica. Al lector que quiera deducir de ello que la autoorganización puede conducir al caos, mientras que la organización, es decir, el control exterior, lo evita, le diremos ya desde ahora que, como veremos, a menudo los procedimientos de control pueden llevar precisamente al caos si se aplican a sistemas autoorganizados.

Pero volvamos brevemente a la física. En la hidrodinámica, la aparición de dibujos crecientemente complejos es un fenómeno muy extendido que quisiéramos ilustrar, para acabar, con la figura 4.26. Aquí, la corriente rodea un cilindro; los sucesivos dibujos corresponden a velocidades crecientes. Así van formándose, en una sucesión bien determinada, diferentes dibujos, todos ellos relacionados con la formación de remolinos.

Todos estos fenómenos pueden parecer una curiosidad, y su estudio, un divertimiento. Pero el ejemplo de la formación de nubes citado al comienzo de este capítulo, ya nos indicaba que también se presentan a escala mucho mayor. Estos fenómenos ofrecen, por ejemplo, una explicación del desplazamiento continental de la corteza terrestre.

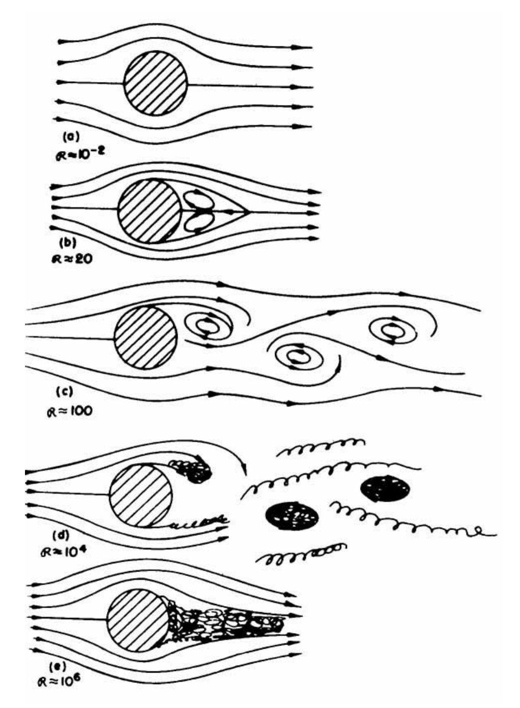


Fig. 4.26: representaciones de las líneas de corriente de un líquido que rodea un cilindro. Cuanto mayor la velocidad de la corriente alrededor del cilindro, tanto más complejo el dibujo hidrodinámico.

Si observamos el globo terráqueo veremos que América del Sur, por ejemplo, encaja directamente en la costa occidental de África. No sólo esta

observación superficial, sino también amplias comparaciones científicas de formaciones geológicas y de los reinos animal y vegetal llevaron al geólogo alemán Alfred Wegener (1880-1930) a su teoría del desplazamiento continental. Según esa teoría, en el curso de millones de años los continentes se desplazaron en la superficie terrestre recorriendo varios miles de kilómetros. La hipótesis parece ciertamente muy osada, puesto que solemos considerar la corteza terrestre como algo firme, rígido. Pero no debemos olvidar que el centro de la tierra está muy caliente y se comporta más bien como un líquido viscoso. Y ésta es la palabra clave, pues en efecto podemos considerar la zona comprendida entre el centro de la tierra y su corteza como un volumen de líquido calentado por sus capas inferiores y con una temperatura determinada en la superficie, lo cual determina precisamente la aparición de corrientes de convección, que se mueven en forma de «rollos» y son capaces de desplazar incluso los continentes. Desde luego se trata de procesos sumamente lentos.

De modo análogo podemos realizar experiencias-modelo con una bola de cristal llena de líquido a la que imprimimos un movimiento rotatorio. También en este caso se forman dibujos especiales, en forma de bandas en movimiento en la superficie del líquido, por ejemplo, los diversos anillos de gas de Júpiter.

La física teórica y la astrofísica están en condiciones de calcular y predecir la formación de estos dibujos. En todos los casos se trata del mismo fenómeno básico: la consagración de determinadas «modas», es decir, de determinadas formas de movimientos que a continuación se autoestabilizan sobre la base del principio de esclavización.

V. QUE SE HAGA LA LUZ. LA LUZ DE LÁSER

Diferentes tipos de luz

En 1960 estaba yo trabajando como asesor científico en los laboratorios Bell Telephone de Murray Hill, EE.UU. Las grandes empresas estadounidenses —mucho más que las europeas— sostienen grandes laboratorios de investigación, en los que la estrecha vinculación entre la búsqueda de los fundamentos más profundos de los fenómenos y las aplicaciones prácticas y eficaces se considera algo natural. Pronto fui iniciado en uno de los secretos centrales de la actividad investigadora de entonces, en la que participaban varios equipos. Se intentaba crear una fuente luminosa que debía generar una luz con propiedades totalmente nuevas. El impulso lo había dado una comunicación de Arthur Schawlow y Charles Townes en 1958. Ya en 1954 Townes había construido junto con sus colaboradores un aparato que generaba de manera totalmente novedosa las llamadas microondas. Igual que las ondas de radio y las de radar, las microondas son ondas electromagnéticas. Nuestros órganos sensoriales no pueden percibirlas; sin embargo, existen. Ocurre igual que cuando estamos a la orilla del mar en una noche tan oscura que las olas nos resultan invisibles; sólo las percibiremos si un bote con una linterna se balancea sobre ellas. Algo parecido ocurre con las ondas electromagnéticas. Una radio, por ejemplo, nos podrá probar su existencia: después de determinadas transformaciones de las oscilaciones electromagnéticas estas ondas resultarán audibles.

La tarea de los laboratorios Bell Telephone (así como de los de la competencia, que tampoco dormía en EE.UU.) consistía en producir ondas luminosas según el principio de la generación de microondas de Townes. Este principio había sido bautizado con el nombre de «máser». Igual que muchos otros términos de la ciencia y técnica modernas, «máser» es una palabra artificial, casi un juego lingüístico. Está formada por las iniciales de unas palabras inglesas que a la mayoría de los lectores le deben de sonar a chino. Las enunciaré sólo por curiosidad: microwave amplification (by) stimulated emission (of) radiation, es decir: amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación... sigue sonando a chino. Pero de allí se derivó fácilmente la palabra «láser». En vez de microondas se quería

obtener ondas luminosas, o sea, láser = light amplification (by) stimulated emission (of) radiation.

Pero no nos detengamos en juegos de palabras y observemos el ingente progreso que significa el láser frente a la lámpara. Para evaluarlo correctamente deberemos ocuparnos primero un poco de las lámparas y la luz que emiten, y veremos que de esta manera obtendremos un acceso muy directo a ciertas ideas fundamentales de la sinergética.

Tomemos como ejemplo la lámpara llamada de descarga. Se trata de un tubo que contiene un gas noble, neón, por ejemplo. Cada átomo del gas está formado por un núcleo con carga positiva y una serie de electrones con carga negativa que giran alrededor del núcleo como los planetas alrededor del sol. A continuación, y para simplificar, sólo nos ocuparemos del comportamiento de un electrón, del llamado «electrón luminoso» (fig. 5.1). En 1913 el físico danés Niels Bohr descubrió que un electrón sólo puede ocupar determinadas órbitas, mientras que otras le están vedadas. Este comportamiento no se pudo explicar hasta la formulación de la teoría cuántica. Según esta teoría, el electrón no se comporta únicamente como una partícula, sino también como una onda que, al girar alrededor del núcleo, debe morderse la cola, por decirlo así. Por este motivo sólo son posibles determinadas órbitas. Normalmente el electrón recorre la órbita más baja, como si avanzara por una cañada (fig. 5.2). Si enviamos una corriente eléctrica a través del tubo, transportada por muchos electrones que revolotean libremente éstos chocan con los átomos del gas. Con lo cual el «electrón luminoso» puede ser empujado hacia una órbita más elevada, más rica en energía (fig. 5.3). De esta órbita puede saltar espontáneamente, es decir de forma repentina e imprevisible, a su órbita original, cediendo la energía así liberada al campo luminoso (fig. 5.4) para continuar su recorrido en la órbita inferior (fig. 5.5). Se origina así una onda luminosa, del mismo modo que se forma una onda sobre la superficie del agua al arrojar una piedra.

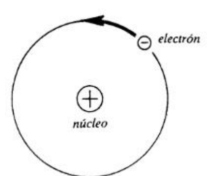


Fig. 5.1: esquema de un átomo (ejemplo de un átomo de hidrógeno). Un electrón, con carga negativa, gira alrededor del núcleo, que tiene una carga positiva.

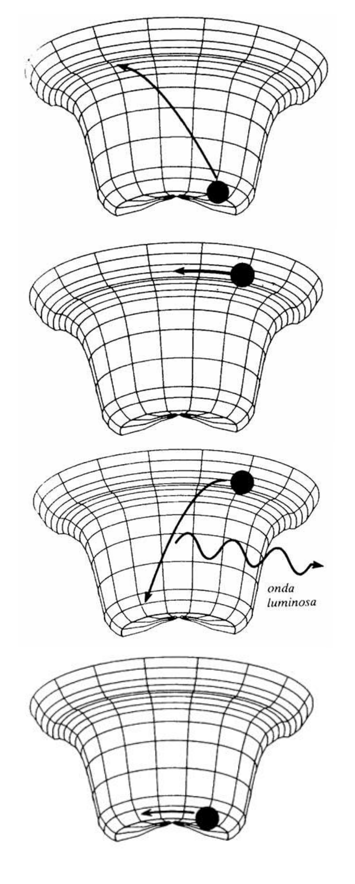


Fig. 5.2: ilustración del movimiento del electrón (esfera negra) alrededor del núcleo atómico. El electrón corre por valles estriados. Si el electrón recibe un suministro de energía desde fuera, por ejemplo, radiación luminosa, puede ser elevado de la ranura inferior a una más alta.

Fig. 5.3: el electrón recorre la ranura más alta, lo cual corresponde al estado excitado del átomo.

Fig. 5.4: el electrón cae de la ranura superior a la inferior entregando su energía en forma de una onda luminosa.

Fig. 5.5: el electrón vuelve a recorrer la ranura inferior.

En una lámpara de descarga este proceso afecta naturalmente a muchos «electrones luminosos». Se generan entonces ondas luminosas muy diversas, como cuando arrojamos irregularmente toda una serie de piedras al agua. Igual que en la superficie del agua se origina un movimiento desordenado del campo luminoso, compuesto de trenes de ondas aisladas en forma de *spaghetti*. Si elevamos la intensidad de la corriente que atraviesa

el gas se excita un número creciente de átomos, y cabe esperar que las marañas de trenes de ondas se hagan cada vez más densas. Así lo creían también muchos físicos.

Según pude demostrar por primera vez en mi teoría del láser (cosa que me alegra hasta el día de hoy), en el láser ocurre algo completamente distinto. En lugar de la maraña aparece un tren de ondas totalmente regular y de longitud prácticamente infinita. Los experimentos realizados a posteriori en diversos laboratorios de todo el mundo confirmaron plenamente mi predicción. Existe, por ende, una diferencia abismal entre la luz de una lámpara común y la del láser. La siguiente analogía nos ayudará a comprender por qué ocurre algo tan curioso.

Representaremos los átomos en forma de hombrecitos situados al borde de un canal lleno de agua (fig. 5.6). El agua simbolizará el campo luminoso. La superficie del agua en reposo corresponde a la ausencia de campo luminoso, es decir, a la oscuridad. Si los hombrecitos hunden sus bastones en el agua, la superficie se verá impelida a ejecutar movimientos ondulatorios, lo cual corresponde a la generación del campo luminoso por parte de los átomos. Como en el caso de la lámpara, el movimiento generado es completamente irregular. La analogía con el láser exigiría, en cambio, que los hombrecitos hundieran sus bastones en el agua de manera completamente uniforme, como cumpliendo una orden, de modo que se originara un movimiento regular en la superficie del agua. En el ámbito humano está claro cómo lograr esta actividad uniforme de los hombrecitos. Detrás de ellos habrá un jefe o capataz que les irá ordenando: «ahora, ahora, ahora», de manera que el hundir de los bastones quede exactamente regulado. Pero en el caso de los átomos del láser nadie se encarga de dar la correspondiente voz de mando. Los átomos autoorganizan, pues, su propia conducta. El láser constituye, por tanto, un ejemplo de la génesis de un estado ordenado por autoorganización, en la cual un movimiento desordenado se transforma en ordenado. Esto hace del láser un ejemplo modélico de la sinergética, que puede servir de alegoría para muchos procesos en terrenos muy diversos, particularmente también en el campo de la sociología.

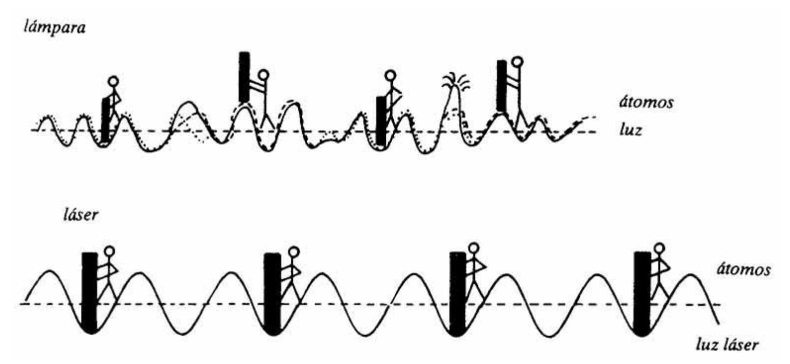


Fig. 5.6: ilustración del funcionamiento de una lámpara y un láser. Los hombrecitos están situados con bastones en la orilla de un canal lleno de agua. En el dibujo superior hunden sus bastones en el agua sin acordar entre sí ritmo alguno. El movimiento revuelto de la superficie del agua corresponde al campo luminoso de una lámpara.
En el dibujo inferior los hombrecitos hunden sus bastones uniformemente en el agua. Se forma una onda uniforme, que corresponde a la luz láser.

Pero antes de estudiarlos debemos seguir profundizando en la idea fundamental de la sinergética. No en último lugar porque de lo contrario podría parecer que trasladamos superficial y directamente, sin reflexión ulterior alguna, los conocimientos de la física a fenómenos tan complejos como la convivencia humana. De todas maneras podemos reconocer fácilmente en el láser algunos rasgos fundamentales que nos acercan un paso más a la comprensión de ciertos procesos de la naturaleza viviente.

La autoorganización en el láser

Observemos más detenidamente un láser para penetrar en el misterio de su autoorganización. Un láser sólo se diferencia de una lámpara de descarga habitual por los dos espejos situados en ambos extremos del tubo de vidrio (fig. 5.7). Estos se encargan de que la luz que corre a lo largo del eje longitudinal del tubo permanezca el mayor tiempo posible dentro del mismo (fig. 5.8). La pequeña permeabilidad a la luz de uno de los espejos permite que

a pesar de todo se irradie un poco de esta luz. Pero ¿por qué se desea que la luz permanezca sometida por más tiempo al orden del láser?

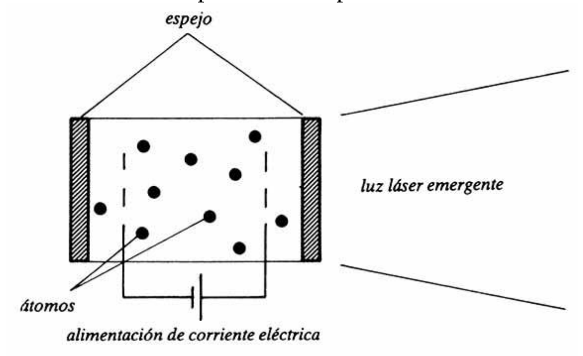


Fig. 5.7: ejemplo de una disposición típica de láser.

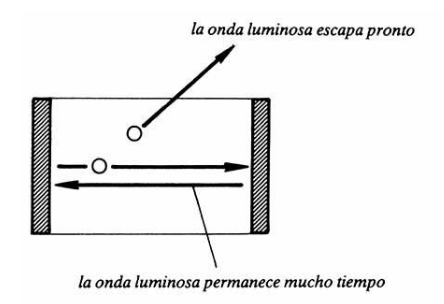


Fig. 5.8: distinto comportamiento de ondas luminosas entre dos espejos. La onda transversal al eje escapa pronto del láser, la paralela al eje permanece mucho tiempo dentro del láser.

Porque entonces puede iniciarse un proceso predicho por Einstein a comienzos de siglo. Si ya hay ondas luminosas presentes, éstas pueden obligar a un electrón excitado a oscilar, a «bailar» a su ritmo. Del mismo modo que un zapateador apasionado refuerza el ritmo de un grupo musical, hasta que finalmente desfallece y se desploma agotado, el electrón también refuerza la onda luminosa, es decir, amplifica las crestas de la onda hasta que, una vez entregada toda su energía a la onda, vuelve a su estado fundamental, el «estado de reposo».

Dado que, gracias a los espejos, las ondas luminosas permanecen un espacio de tiempo relativamente largo dentro del láser, éstas pueden «hechizar» un número creciente de electrones luminosos excitados y obligarlos a hacer cada vez más altas las crestas de las ondas.

Aunque tampoco son necesariamente iguales todas las ondas con igual altura de crestas. En unas, una cresta sigue rápidamente a la anterior; en otras, la distancia entre las crestas es mayor (fig. 5.9). En efecto, al comienzo de toda emisión de rayos láser existen en el láser ondas totalmente distintas en este sentido, ondas ya emitidas previamente por algunos electrones luminosos «indiscretos». Estas ondas compiten en su afán de obtener un refuerzo de los otros electrones luminosos estimulados. Pero los electrones no refuerzan las distintas ondas luminosas por un igual, sino que entregan su energía preferentemente —con una preferencia en general pequeña— a una onda determinada, concretamente la que más se aproxima al «ritmo de danza interior» de los electrones luminosos. Por lo tanto, aunque esa onda especial sólo suela ser la preferida por un estrecho margen, se ve reforzada en avalancha y acaba triunfando sobre todas las demás. Éstas quedan sojuzgadas y toda la energía de los electrones luminosos va a dar a esa sola onda de oscilación enteramente regular. A la inversa, una vez que esa onda se ha impuesto sobre las demás, obliga a cada nuevo electrón estimulado a ingresar en su esfera de influencia y a oscilar al mismo ritmo. La nueva onda determina así el orden en el láser, desempeña el papel de ordenador, un concepto que hemos mencionado ya repetidas veces.

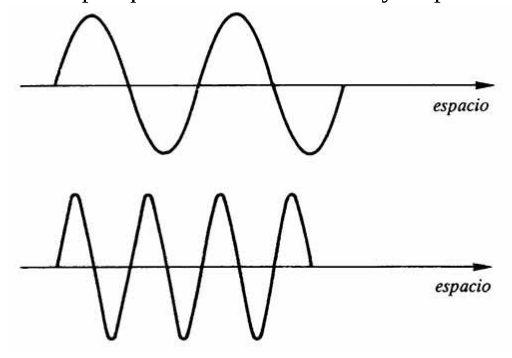


Fig. 5.9: «ondas iguales pero distintas». Dos ondas con igual altura de crestas pero distinto espacio entre crestas.

Dado que este ordenador hace oscilar a los electrones al mismo ritmo, imponiéndoles así su comportamiento, diremos una vez más que el ordenador «esclaviza» a cada uno de los electrones. Pero, recíprocamente, son los propios electrones los que crean la onda luminosa, es decir, el ordenador, mediante su oscilación regular. La aparición del ordenador y el comportamiento coherente de los electrones se condicionan mutuamente. He aquí otra conducta típicamente sinergética. Para que los electrones oscilen a un ritmo parejo tiene que haber un ordenador: la onda luminosa. Pero ésta sólo se genera merced a la oscilación regular de los electrones. Podríase pensar que es necesario postular la intervención de un poder superior que cree el estado de orden inicial, que luego podría mantenerse por sí mismo. Pero, como acabamos de ver, no es así. Antes ha tenido lugar una competencia, un proceso de selección en el cual todos los electrones han acabado siendo esclavos de determinada onda. Lo interesante es que al principio las diferentes ondas son generadas de manera totalmente casual y espontánea por los electrones, para ser escogidas, seleccionadas, luego sobre la base de las leyes de la competencia. Esta alternancia es típica de la sinergética; en este caso, la «casualidad» está representada por la emisión espontánea de radiación, mientras que la inexorable ley de la competencia encarna la «necesidad».

El láser, un sistema abierto con una transición de fase

¿Se puede convertir cualquier lámpara en un láser con sólo colocarle los espejos? Casi podríamos decir que es así, pero tenemos que tener en cuenta otra cuestión esencial. En la lámpara, las ondas luminosas emitidas por los electrones luminosos estimulados escapan tan deprisa que no les queda tiempo para que otros electrones luminosos las refuercen. Esto significa que la emisión estimulada no puede tener lugar y que los distintos trenes de ondas no pueden hacerse prolongar su «vida». Se irradian de forma completamente incoherente las ondas más diversas. Los espejos del láser están destinados a impedir que las ondas luminosas se fuguen a lo largo del eje, a fin de que la amplificación de las ondas mediante emisión estimulada dure el tiempo suficiente. Pero no existe ningún espejo tan perfecto como para poder mantener la luz eternamente dentro del láser, y también hay otras causas, como por ejemplo la dispersión, que llevan a una

pérdida de luz. Además, en todas las aplicaciones del láser los espejos deben permitir la salida de un poco de luz; en definitiva, se trata de proyectar la luz del láser sobre los objetos más diversos.

La posibilidad de producir luz láser es, por consiguiente, un problema cuantitativo. Requiere que estimulemos los electrones luminosos de los átomos de gas en una sucesión lo suficientemente rápida para que aquéllos puedan amplificar las ondas luminosas con la suficiente velocidad y eficacia, compensando así las pérdidas debidas a los espejos. En otras palabras, debemos procurar que la pérdida de energía de las ondas se vea compensada por una ganancia de energía por emisión estimulada. De lo cual podemos inferir que el paso de la luz de lámpara a la luz láser se produce de forma repentina al aumentar la corriente eléctrica enviada a través de tubo. Existe, por tanto, una intensidad crítica, alcanzada la cual cambia dramáticamente el estado de orden del láser, aunque la intensidad de la corriente varíe sólo de forma mínima. La única manera de mantener la actividad láser consiste suministrar continuamente energía al láser; en forma de corriente eléctrica, por ejemplo. A la vez, constantemente se irradia energía en forma de luz láser (y de otras pérdidas). El láser intercambia constantemente energía con el medio; es, pues, un sistema *abierto.* Al mismo tiempo se convierte así en un sistema que está muy lejos del equilibrio térmico, de manera similar a lo que sucede con un motor de gasolina.

La repentina aparición de un estado de orden macroscópico recuerda mucho el comportamiento de un imán de hierro o un hiperconductor, en los que también se forman estados de orden con propiedades físicas completamente nuevas. Sin embargo, estos sistemas están en equilibrio térmico con su medio, cosa que precisamente no sucede en el caso del láser. Por eso, muchos físicos se sorprendieron cuando en Stuttgart logramos probar, al mismo tiempo que un grupo americano, que la transición del láser presenta todas las características de una transición de fase habitual, incluidas las «fluctuaciones críticas» y la «ruptura de la simetría». El láser aparece así como un puente entre la naturaleza inanimada y la animada. Obtiene su estado de orden a través de la autoorganización, precisamente cuando aumentamos la alimentación de energía. Como todos los sistemas biológicos, es un sistema abierto.

Una conexión interesante con los procesos vitales se encuentra sobre todo en los láseres químicos, en los cuales tiene lugar una especie de metabolismo. Al láser químico se le suministran sustancias como el hidrógeno y el flúor. Estas sustancias reaccionan intensamente entre sí. Se forman nuevas asociaciones entre los átomos del hidrógeno y del flúor, y la unión química entre las sustancias se efectúa con tanta energía que estimula a los electrones luminosos. Estos irradian entonces la luz láser tal como se ha descrito antes. En suma, aquí se crea energía a base de reacciones químicas. La energía química, que de ordinario se libera en forma de calor, se transforma aquí en la energía ordenada del movimiento ondulatorio estrictamente periódico de la luz láser. En cierto modo nos hallamos ante un metabolismo, en el que la energía de combustión, de poco valor, se transforma en valiosa energía luminosa. Es como un motor, en cuyo cilindro explota una mezcla de gases. La energía térmica, repartida sobre muchos grados de libertad, se transforma en la energía motriz del pistón y finalmente impulsa un automóvil. Más adelante veremos repetidas veces que la transformación de energías microscópicas en una energía macroscópica con pocos grados de libertad parece ser uno de los principios fundamentales de los fenómenos biológicos.

La actividad láser puede provocarse no sólo mediante el aumento de la intensidad de la corriente, con lo cual los electrones luminosos son estimulados con mayor frecuencia. También se puede considerar otro proceso en el cual no se varía la intensidad del estímulo por átomo, para aumentar en cambio continuamente el número de átomos láser. Se ve entonces que por debajo de cierto número de átomos láser no hay actividad láser, pero que ésta se inicia repentinamente cuando la cantidad de átomos supera ese número crítico. Asistimos aquí a una verdadera transformación de cantidad en calidad.

Estos ejemplos muestran que los procesos autoorganizados pueden provocarse de maneras muy diversas. Volveremos a hablar varias veces de ello cuando tratemos sus aplicaciones biológicas.

El láser también permite establecer conexiones con la biología en otro sentido. Mediante la instalación de los espejos creamos determinado «medio ambiente» para los átomos láser y las ondas luminosas que generan. La física demuestra que entre dos espejos paralelos sólo tienen cabida determinadas ondas luminosas muy concretas (fig. 5.10). Ello significa que

desde un principio éstas serán las únicas ondas posibles como ondas láser. Ahora bien: ciertamente puede ocurrir que la onda preferida, aquella en que los electrones de los átomos quisieran emitir su radiación, no quepa en absoluto como tal onda entre los espejos. En ese caso los electrones no renuncian a la emisión de luz láser, sino que escogen aquella onda que más se aproxime al ritmo de la que en realidad prefieren (con todo, esto sólo es posible dentro de ciertos límites). Si vamos modificando lentamente la distancia entre los espejos, cambia correspondientemente la emisión de luz láser de los electrones; en otras palabras, éstos se adaptan a su nuevo ambiente. Y entonces puede suceder algo notabilísimo. Puede darse el caso de que entre los espejos quepa una nueva onda más parecida a la «onda preferida» de los electrones que aquella que seguían y reforzaban hasta entonces. Primero, algunos electrones comenzarán a ceder espontáneamente, en una especie de fluctuación, su energía a esta nueva onda, hasta que poco después todos los electrones la refuercen, abandonando por completo la anterior; se trata, pues, de una adaptación a un nuevo «medio ambiente de espejos», desencadenada por una fluctuación.

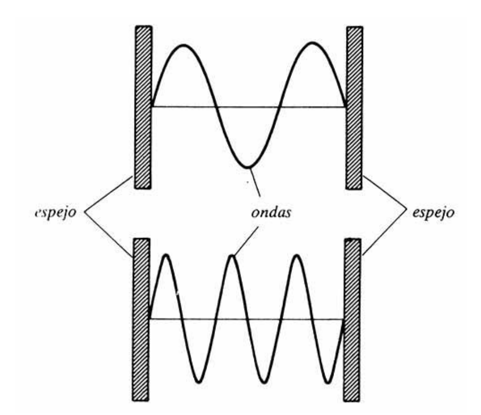


Fig. 5.10: entre dos espejos sólo caben determinadas ondas.

Tanto en el láser como en los líquidos se puede alcanzar un estado de orden macroscópico mediante una alimentación energética más intensa. Si suministramos cada vez más energía a un líquido, se forman dibujos crecientemente complejos hasta que finalmente aparece la turbulencia. En el

láser ocurre lo mismo. Si seguimos aumentando la intensidad de la corriente, de pronto el láser comienza a emitir regularmente destellos de luz brevísimos y muy intensos. Cada destello puede emitir una potencia equivalente a la de la suma de todas las centrales eléctricas de Estados Unidos, pero dura una billonésima de segundo. Estos destellos de luz —llamados también pulsaciones ultracortas de láser— se forman por la cooperación de muchas ondas distintas. Ha cesado, por tanto, la lucha competitiva entre ellas, para ceder el paso a un inmenso esfuerzo conjunto. Por último, nuestra teoría predice que los láseres pueden producir un nuevo tipo de luz: la luz turbulenta, un nuevo campo de investigación para el físico experimental.

VI. DIBUJOS QUÍMICOS

Agencia matrimonial química

La química moderna nos aporta ejemplos especialmente bonitos de dibujos extensos. Como todos sabemos, determinadas sustancias químicas pueden reaccionar entre sí dando origen a otras sustancias. Los ejemplos más comunes son, naturalmente, los procesos de combustión, en los que se combinan elementos químicos como el carbono y el oxígeno. A menudo —como ya queda patente en el ejemplo— una reacción química no se inicia por sí sola. Para que el carbono se inflame necesitamos cierta temperatura mínima. Sin embargo, los químicos descubrieron que con frecuencia existe otra posibilidad de iniciar o cuanto menos facilitar reacciones químicas. Añadiendo determinadas sustancias puede lograrse que se produzca una reacción que de lo contrario no se produciría o lo haría muy lentamente. Estas sustancias pueden ser, entre otras, chapas de ciertos metales, como por ejemplo el platino. Las propias sustancias especiales añadidas permanecen inalteradas durante la reacción. Sólo hacen las veces de agencia matrimonial que media entre los futuros cónyuges: permiten que las sustancias químicas contraigan nuevas uniones. En química, estas agencias matrimoniales se llaman «catalizadores» (fig. 6.1). Al investigarlos, los químicos se encontraron con un fenómeno que antes se consideraba una curiosidad aislada, pero que actualmente está adquiriendo creciente importada: hay sustancias capaces de catalizarse a sí mismas. Esto parece muy complicado, pero no significa sino que las moléculas de una de estas sustancias pueden multiplicarse solas, por así decirlo. Logran transformar y agrupar otras moléculas hasta formar nuevas moléculas de su propia clase (fig. 6.2). Aquí ya se identifica directamente una característica de la vida, y no nos sorprenderá reencontrarnos con este tipo de fenómenos en la teoría de la evolución. Las reacciones en las que las sustancias se catalizan a sí mismas se denominan autocatálisis. ¿Qué ocurre micro y macroscópicamente en los procesos químicos?

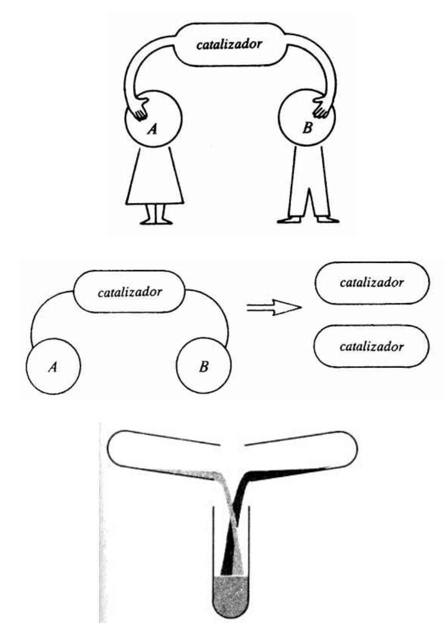


Fig. 6.1: el catalizador, agencia matrimonial química.

Fig. 6.2: un catalizador enlaza dos moléculas de manera que se forme otro catalizador de su misma clase. Esta es la autocatálisis.

Fig. 6.3: el vertido en el mismo vaso y la mezcla de sustancias químicas lleva habitualmente a un producto final homogéneo.

Microscópicamente, las sustancias están compuestas de moléculas, integradas a su vez por átomos. Estas moléculas, de una clase 1 y una clase 2, pongamos por caso, se reúnen en una reacción química y forman una nueva molécula de la clase 3. En ese proceso suelen cambiar las propiedades físicas y químicas de las moléculas, como por ejemplo su color, lo cual se puede ver claramente en las reacciones. Un líquido azul y uno incoloro pueden convertirse, por ejemplo, en un líquido rojo (fig. 6.3). Por lo general, la nueva sustancia tiene una coloración totalmente homogénea, que en adelante no variará. Pero no tiene que ser necesariamente así siempre, lo cual nos lleva al verdadero tema de este capítulo.

En efecto, en el curso de este siglo se han hallado con algunas reacciones, bastante complejas por cierto, en las que se forman dibujos macroscópicos cuyas dimensiones son miles de millones de veces mayores que las de las propias moléculas.

Relojes químicos

El ejemplo más famoso es un esquema de reacción descubierto por el ruso B. P. Belousov e investigado luego sistemáticamente por A. M. Shabotinsky. La reacción es tan complicada que no la examinaremos en detalle. Pero lo interesante son los dibujos químicos que van formándose durante la misma. Con el paso del tiempo el líquido va cambiando periódicamente de color, alternando el rojo y el azul (fig. 6.4). Con esta reacción se podría construir un reloj, puesto que los relojes no son sino instrumentos que nos indican permanentemente cierta duración periódica. Debemos agregar que en el experimento original simplemente se juntaron las sustancias y se mezclaron muy bien; fue la propia reacción, abandonada a sí misma, la que mostró la alternancia periódica de colores. Esta alternancia no es eterna, por cierto. Después de algún tiempo —unos minutos— se establece un estado de reposo definitivo.

Sin embargo, podemos modificar el experimento de manera que se vayan agregando constantemente las sustancias de partida y extrayendo los productos formados. Entonces se puede mantener permanentemente una reacción con alternancia de colores.

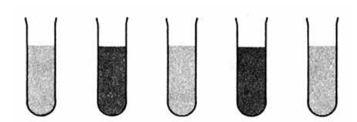


Fig. 6.4: la alternancia periódica de los colores rojo y azul en la reacción de Belousov-Shabotinsky.

El descubrimiento de estas oscilaciones es muy importante para la biología, dado que los procesos que se dan en los organismos tienen una base química o electroquímica. Una vez entendido el funcionamiento de los relojes químicos habremos dado un gran paso hacia la comprensión de los fenómenos rítmicos del organismo, como por ejemplo el latido cardiaco. Igual que en el láser, en estos fenómenos oscilatorios cobran una importancia fundamental los conceptos de ordenador y principio de esclavización. A determinadas concentraciones de la sustancia añadida, el desarrollo normalmente uniforme de la reacción se vuelve inestable y es reemplazado por la modificación periódica, es decir, por una oscilación. Esta oscilación

desempeña el papel de ordenador y esclaviza las moléculas, pues las obliga a formar periódicamente nuevas uniones, para luego romperlas, y así sucesivamente, de modo que el líquido en su conjunto aparece, en nuestra visión macroscópica, con una alternancia periódica de los colores rojo y azul. Es posible dar un tratamiento matemático a estos procesos oscilatorios y determinar el significado preciso del ordenador. Investigaciones recientes han demostrado que el metabolismo de cada célula, en el que interviene un intercambio de energía, se desarrolla de manera rítmica, periódica.

Ondas y espirales químicas

Hay fenómenos aún más bonitos y complejos, como muestran los dibujos de la figura 6.5. Se trata nuevamente de la reacción de Belousov-Shabotinsky, en la que en centros inicialmente casuales se forman puntos azules sobre un fondo rojo. Los puntos azules crecen hasta convertirse en discos azules, en los que se forma luego un punto rojo que se transforma rápidamente en un disco de ese color. En este disco aparece entonces un nuevo punto azul, y el juego se repite. De esta manera, van alejándose de su centro anillos azules concéntricos. En otras condiciones experimentales, por ejemplo si se atraviesa el líquido con un clavo, se forman espirales, de las que vemos una secuencia temporal en la figura 6.6.

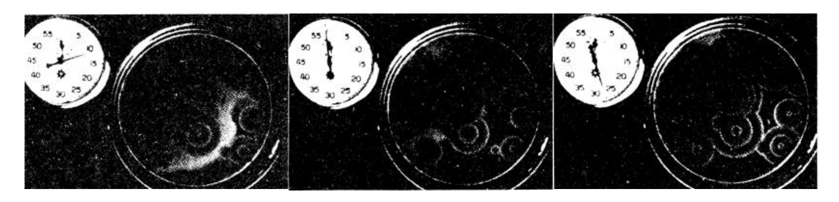
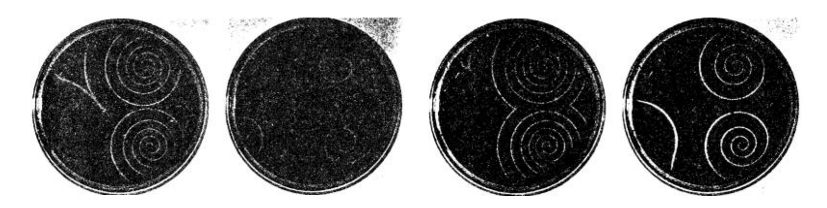


Fig. 6.5 y 6.6: ejemplos de dibujos químicos en forma de círculos concéntricos (*arriba*) o espirales (*abajo*). Los círculos migran hacia fuera, mientras que las espirales giran.



A primera vista parece difícil comprender la formación de estos dibujos macroscópicos, pero podemos recurrir a un ejemplo sencillo para explicarlo. La formación de anillos concéntricos se puede comparar con un incendio en la estepa. El fondo rojo representa una zona de hierba seca. Si incendiamos la hierba en un punto y no sopla nada de viento, el fuego se extenderá uniformemente en todas las direcciones, es decir, en forma de círculo. Si consideramos que la superficie quemada es azul, se produce una mancha azul que va creciendo sin cesar hacia fuera. En el interior del círculo la hierba puede volver a crecer y secarse, de manera que se forma una mancha roja. Dado que la hierba va creciendo detrás del frente de avance de las llamas, pero todavía no es combustible, la mancha roja se irá extendiendo hacia fuera hasta que la hierba de su interior esté lo suficientemente seca para poder quemarse; entonces recomienza el proceso. En las reacciones químicas que hemos abordado no se requiere una intervención exterior que encienda la chispa. El propio sistema es, por decirlo así, hipercrítico y puede iniciar *motu proprio* la reacción que lleva a los puntos azules. Pero por lo demás tenemos fenómenos muy parecidos. La combustión de la hierba significa que, igual que en la reacción de Belousov-Shabotinsky, se producen determinadas transformaciones químicas. Luego tiene lugar una reacción inversa, que lleva al restablecimiento del estado anterior.

En las ondas o espirales de la reacción de Belousov-Shabotinsky las moléculas que reaccionan entre sí tienen que entrar en contacto, es decir, tienen que poder moverse. Cosa que hacen por difusión, un fenómeno que conocemos muy bien de la vida cotidiana. Cuando un papel secante absorbe una mancha de tinta, por ejemplo, ésta penetra en el secante por difusión y sigue extendiéndose a través de él, con lo cual se forma una mancha de tinta en el propio papel secante. Los fenómenos macroscópicos aquí discutidos se basan, por consiguiente, en la alternancia de reacciones químicas y difusiones. Estos fenómenos se describen mediante ecuaciones, que en el lenguaje técnico se llaman ecuaciones de reacción-difusión; pero naturalmente

no nos ocuparemos de ellas aquí. Lo único importante para nosotros es saber que en este caso el tratamiento matemático demuestra una vez más la existencia de ordenadores que gobiernan el desarrollo de los dibujos espacio-temporales. Según el tipo de ordenadores podrán formarse concretamente ondas circulares o espirales.

Un nuevo principio común

Como hemos podido ver en los ejemplos concretos de la física del láser, la física hidráulica y ahora la química, en todos estos casos nos encontramos con el concepto de ordenador, por una parte, y el de esclavización, por la otra; conceptos que seguirán atravesando el libro como un hilo conductor. En el caso de las reacciones químicas, descubrimos por primera vez un nuevo principio común. A las oscilaciones y ondas químicas que acabamos de conocer siempre subyacen procesos autocatalíticos. La presencia y colaboración de cierta clase de moléculas posibilita la producción de más moléculas de la misma clase. Desde esta perspectiva puede observarse bajo una nueva luz lo que ocurre en el láser. También en él, una onda luminosa ya existente obligaba, con su presencia, a los electrones de los átomos a ceder su energía para reforzar esa misma onda luminosa. Se daba, por tanto, un verdadero proceso autocatalítico (fig. 6.7).

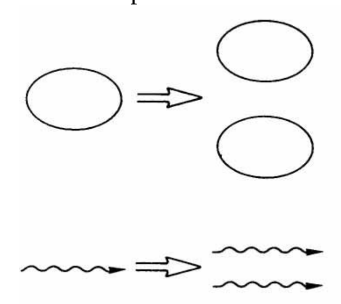


Fig. 6.7: la analogía entre la autocatálisis de moléculas (arriba) y la amplificación (= multiplicación) de ondas luminosas en el láser (abajo).

Análogamente a los conceptos de ordenador y esclavización, el de autocatálisis ha alcanzado, por tanto, una significación que trasciende ampliamente el terreno de la química. En este sentido, también el movimiento giratorio en los líquidos tiene carácter de autocatálisis. El movimiento en

forma de «rollos» se ve reforzado por la formación inicial, totalmente casual y tal vez mínima, de un movimiento giratorio. La autocatálisis y la desestabilización de formas de movimiento colectivo son una misma cosa. Queda patente que la naturaleza aplica claramente siempre los mismos principios para producir movimientos ordenados o dibujos de carácter macroscópico.

VII. LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA. LA SUPERVIVENCIA DEL MÁS APTO

A comienzos del siglo pasado, el origen de las diversas especies animales y vegetales todavía constituía un secreto celosamente guardado por la naturaleza para el entendimiento humano. El inglés Charles Darwin (1809-1882) logró desvelarlo decisivamente. En sus viajes de investigación a América del Sur y otras lejanas tierras le llamó la atención la impresionante variedad de los reinos animal y vegetal y sus refinados órganos destinados a la supervivencia. Tras largos años de reflexión sobre estas observaciones, formuló tesis enteramente nuevas acerca del origen de las especies animales y vegetales, unas tesis que en sus rasgos fundamentales siguen siendo plenamente válidas. Hoy en día esta teoría se conoce como darwinismo. Una designación con la cual olvidamos, por cierto, que un joven inglés, Alfred Russel Wallace (1823-1913) formuló contemporánea e independientemente de Darwin las mismas ideas.

Darwin escribió su hoy famosa carta a Charles Lyell (1797-1875) en 1856, dos años antes de que Wallace le comunicara su formulación de la teoría de la evolución (noticia que dejó desconcertado a Darwin). En ella le explicaba que todavía no estaba del todo dispuesto a publicar sus ideas, como le había sugerido Lyell, para evitar que otro investigador se le adelantara. Darwin escribe: «No me agrada la idea de publicar por mor de la prioridad, aunque por otra parte me fastidiaría que alguien publicara mis tesis antes que yo.» (Las palabras de Goethe de que «dos almas conviven, ay, en mi pecho» parecen ajustarse a los sentimientos de muchos científicos, según lo ilustra el sociólogo de la ciencia R. F. Merton con este ejemplo, entre otros muchos.)

Y luego, en 1858, el destino golpea a Darwin. Ocurre aquello contra lo cual le había prevenido Lyell y que él no había querido creer. Sobre ese acontecimiento angustioso para él, Darwin escribe así a Lyell: «(Wallace) me ha enviado hoy el escrito adjunto y me ha pedido que se lo haga llegar. Me parece muy digno de leerse. Sus profecías se han cumplido con escarnio: se me han anticipado. Nunca vi un ejemplo más contundente de coincidencia. Si Wallace hubiese copiado mi borrador de 1842, no habría po-

dido resumirlo mejor. Incluso sus términos son ahora los títulos de mis capítulos. Toda mi originalidad, cualquiera que fuese su valor, queda destruida.»

La modestia y el desinterés impulsan a Darwin a renunciar a su reclamación de prioridad; su deseo a ser reconocido como autor lo lleva a no darlo todo por perdido. Con su característica generosidad, pero sin fingir indiferencia, al principio toma la decisión desesperada de apartarse del asunto. Una semana más tarde vuelve a escribirle a Lyell planteándole la posibilidad de publicar tal vez una versión abreviada de su texto completado hace ya tiempo, unas doce páginas. Sin embargo, agrega afligido: «No puedo convencerme de que pueda hacerlo honorablemente.» Sacudido por sentimientos encontrados, finaliza: «Querido, apreciado amigo, le ruego me disculpe. Ésta es una carta fútil, movida por sentimientos fútiles.» Y con el intento de liberarse definitivamente de estos sentimientos, añade esta frase: «Nunca más les molestaré, a usted ni a Hooker, con este asunto.»

Al día siguiente vuelve a escribirle a Lyell, esta vez para retractarse de la última frase; pero sigue angustiado. El destino quiere que precisamente en ese momento Darwin se vea convulsionado por la muerte de su joven hija. Logra satisfacer la petición de su amigo Joseph Dalton Hooker (1817-1911): le envía el manuscrito de Wallace y su propia versión original de 1844. Escribe: «Sólo para que usted pueda comprobar, al reconocer las acotaciones escritas con su letra, que ya había leído usted mi manuscrito. Me entristece estar tan preocupado por la cuestión de quién ha sido el primero.»

Otros miembros de la comunidad científica harán lo que el afligido Darwin no quiere hacer por sí mismo. Lyell y Hooker se ocupan del asunto y organizan aquella reunión trascendente en la que se presentarán ambos trabajos ante la sociedad Linné.

Aquella fue, por tanto, la hora oficial del nacimiento de la teoría de la evolución. Poco faltó, como se ve, para que hoy día no se hablara de darwinismo sino de wallacismo. En el capítulo 16 hablaremos de la razón de la actual fama de Darwin y del casi olvidado Wallace. Pero enunciemos ahora las tesis fundamentales de Darwin.

Según Darwin, en la naturaleza tiene lugar una evolución en la que se van formando seres vivientes más complejos a partir de seres vivientes menos complejos. En esta evolución desempeña un papel fundamental la interrelación entre los factores hereditarios —es decir, el genotipo— por una

parte, y los propios animales y plantas, que se nos presentan como tales en su forma desarrollada —es decir, como fenotipo—, por la otra. Darwin suponía que los factores hereditarios pueden modificarse espontáneamente. Estos cambios son las mutaciones. Hoy en día sabemos que estas mutaciones se pueden comprobar en los genes, los cuales transmiten los factores hereditarios. Estos cambios son, pues, de naturaleza microscópica.

A raíz del cambio en los factores hereditarios se modifican las características de los animales o las plantas. Los descendientes de mariposas blancas, por ejemplo, pueden tener alas negras; algunos miembros del cuerpo pueden aparecer mutilados o modificados. Con estos cambios, los animales pueden aprovechar mejor o peor su ambiente natural. Hay pájaros que gracias a la modificación de su pico, por ejemplo, lograr picotear insectos que antes no podían coger. La naturaleza nos sorprende una y otra vez con la plétora y variedad de sus formas; a menudo logramos reconocer rápidamente su alta funcionalidad. En siglos anteriores esta funcionalidad parecía destinada a un fin; se creía que Dios había creado los animales de manera que pudieran encontrar perfectamente sus alimentos. Según Darwin, empero, esas formas son producto del azar de la mutación, por un lado, y de la selección, por el otro. Los distintos animales, mejor o peor adaptados a su medio, entran en competencia en su búsqueda de alimento. También compiten de otras maneras, como por ejemplo los pájaros al buscar sus nidales, o diversos animales en su lucha por un lugar protegido. Con ello se establece una lucha competitiva entre las distintas especies y sobrevive únicamente la mejor de ellas. Éstas son, en resumen, las tesis fundamentales del darwinismo.

Sin embargo, sus formulaciones presentan una serie de problemas, que fueron identificados sobre todo por algunos biólogos y filósofos naturalistas. La frase de que «sobrevive el mejor» es como un perro que se muerde la cola, porque se define el más apto como aquel que sobrevive. Con todo, es posible cortar este nudo gordiano si trazamos una analogía con el mundo inanimado. Efectivamente, el darwinismo no existe sólo en la naturaleza viviente, sino también en la materia inorgánica. Ya lo hemos visto en el caso del láser, al comprobar que entre las ondas láser tiene lugar una lucha competitiva a la que también sobrevive una sola onda. Desde luego, podemos definir como «la mejor» esa onda superviviente. Pero lo importante es que en la física del láser podemos calcular de antemano cuál será la moda,

o sea, la onda, que sobrevivirá y cuál es, por tanto, la mejor. Existen criterios objetivos que nos permiten decir, antes de iniciarse todo el proceso, quién lo ganará. Esto vale siempre, con una pequeña salvedad: en algunas ocasiones puede haber varias ondas que sean simultáneamente las mejores candidatas.

La única posibilidad de que se rompa la simetría entre esas ondas o, en otras palabras, de que se trace la selección definitiva entre ellas, se dará como consecuencia de una oscilación casual que no podemos predecir. Pero al lado de esas modas destacadas hay otras muchas de las que podemos afirmar con absoluta seguridad que no sobrevivirán.

La física del láser nos brinda, pues, un modelo físico que permite reproducir experimental y matemáticamente las afirmaciones del darwinismo. Aquí se verifica muy pronto el enunciado del darwinismo en todo su rigor.

El fenómeno de las oscilaciones láser, que «viven» de los átomos estimulados, es directamente extrapolable a la naturaleza animada. Cuando distintas especies viven de los mismos alimentos, a raíz de la lucha competitiva sobrevive efectivamente sólo la especie más capaz o más apta; por ejemplo, la que puede apropiarse más rápidamente de los alimentos.

La competencia de las biomoléculas

Este tipo de analogía entre los procesos de selección de la naturaleza animada y la inanimada no se limita a las oscilaciones láser. Otro vínculo muy parecido entre lo «inanimado» y lo «animado» se establece en la teoría de la evolución de Eigen, que parte de la transmisión de los factores hereditarios por determinadas «bio»-moléculas, de las que nos ocuparemos más detalladamente en el capítulo 9. En el presente contexto, bastará señalar que estas biomoléculas (¡igual que las modas láser!) pueden reproducirse por autocatálisis y competir entre ellas. Por lo demás, en la versión original de la teoría de Eigen las ecuaciones que describían la reproducción de las biomoléculas tenían exactamente la misma forma que las que trataban de la «reproducción» de las ondas láser. Es bastante improbable que semejante coincidencia en dos terrenos completamente distintos sea casual, sobre todo si tenemos en cuenta que los autores establecieron las ecuaciones con total independencia uno del otro; más bien insinúa la existencia de principios de validez universal, que de hecho iremos encontrando a lo largo de este libro.

El especial atractivo de esa teoría de la evolución está en que establece una conexión entre la naturaleza inanimada y la animada a través de la mutación y la selección, y con ello a través de una «evolución ascendente» de las biomoléculas, y en que apunta a una transición más o menos continua de lo «inanimado» a lo «animado». Sin duda queda por delante una enorme tarea de investigación precisamente en el terreno de la bioquímica, pero ya se ha dado un primer paso prometedor.

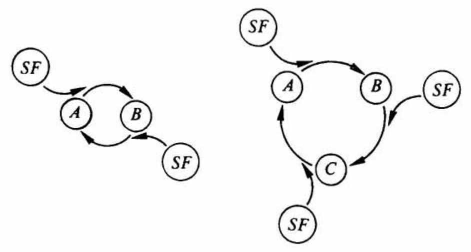


Fig. 7.1: dos ejemplos del hiperciclo de Eigen.
Esquema de la izquierda: la clase A de moléculas se reproduce autocatalíticamente, pero necesita el concurso de la clase B de moléculas como catalizador. Del mismo modo la clase B de moléculas se reproduce autocatalíticamente, pero necesita la intervención de la clase A como catalizador. SF indica que la producción de estas moléculas tiene lugar a partir de determinadas sustancias fundamentales.

El esquema de la derecha muestra un hiperciclo con tres clases distintas de moléculas; cada una de ellas se reproduce autocatalíticamente, pero necesita el concurso de otra clase de moléculas, como se indica en el dibujo. El número de clases de moléculas intervinientes puede ser aún bastante mayor.

Sólo unas observaciones más para completar nuestra visión. En los últimos años, Manfred Eigen y Peter Schuster han ido perfeccionando sus ideas sobre la reproducción autocatalítica de las biomoléculas. El caso más simple que puede presentarse es aquel en el que intervienen dos clases de moléculas, A y B, cada una de las cuales se reproduce autocatalíticamente. Pero además, la clase A contribuye en calidad de catalizador a la reproducción de la clase B y viceversa. Así resulta el esquema de la izquierda de la figura 7.1., que puede ampliarse a varias clases de moléculas. En el caso de tres clases, A, B y C, éstas se reproducen automáticamente, pero además A ayuda a la reproducción de B, B a la de C, y C, finalmente, a la de A, siempre en calidad de catalizadores. Eigen y Schuster denominan «hiperciclos»

estos ciclos menores o mayores. Los propios hiperciclos pueden estar sometidos a su vez a mutaciones y competir entre sí.

En suma: el darwinismo actúa tanto en las modas láser y las biomoléculas, como en los hiperciclos y en los reinos animal y vegetal.

El hecho de que los principios de Darwin puedan aplicarse también a la materia inanimada, y no sólo a la animada, es un indicio de su enorme alcance. También tienen una significación inmediata para la sociología, que se ocupa de problemas tales como la lucha competitiva en la vida laboral y económica. Aplicadas en este sentido tendrán como consecuencia la selección entre las empresas que fabrican el mismo producto a distintos precios, a través de la lucha competitiva, hasta que quede una sola, que entonces dominará todo el mercado. ¿Es verdaderamente tan natural esta tendencia al monopolio, es decir, la tendencia a que en la dura lucha competitiva sobreviva sólo el que sea absolutamente mejor? También aquí la naturaleza nos muestra algunas salidas. Hablaremos de ellas en el próximo capítulo.

VIII. COMO SOBREVIVIR SIN SER EL MEJOR: ESPECIALÍZATE, CRÉATE UN NICHO ECOLÓGICO

Sometida a un examen más minucioso, la tesis de que sólo sobrevive el mejor plantea varios serios problemas. ¿No debería sorprendernos, en virtud de esta tesis, la existencia de tal variedad de especies sobre la Tierra? ¿Son acaso todas ellas las mejores?

Estas cuestiones nos impulsan a seguir profundizando en el tema de la supervivencia.

De hecho, la naturaleza ha desarrollado un sinnúmero de trucos para eludir la tesis de que únicamente sobrevive el mejor. Por una parte, naturalmente sólo puede establecerse una lucha competitiva si las distintas especies que compiten viven en un espacio común. Es obvio que no hay competencia entre animales terrestres que vivan en continentes distintos separados por mares. En Australia, por ejemplo, se ha desarrollado un reino animal muy diferente del de otros países: pensemos en los marsupiales, de los que el canguro es sólo un ejemplo.

Pero aun cuando las especies vivan muy próximas entre sí, a menudo han logrado crearse nuevos espacios vitales. Pensemos, por ejemplo, en los pájaros que accedieron a distintas fuentes de alimentación gracias a las muy diversas formas de sus picos (fig. 8.1). Esas especies de pájaros escaparon de la dura lucha competitiva creándose un «nicho ecológico». En este sentido puede decirse, naturalmente, que se han convertido en la mejor especie en su especialidad, dado que es la única que posee esa capacidad especial. En cierto modo, un nicho ecológico es una reserva, una zona protegida, en la que una especie determinada puede vivir por sí sola sin ser molestada. Nuestro ejemplo de las fuentes de alimentación muestra que los nichos ecológicos no tienen que ser necesariamente zonas separadas en el espacio, pese a que la separación espacial actúa evidentemente, y con mayor razón, como nicho ecológico.

Por lo demás, la coexistencia basada en la especialización no se limita de ningún modo a la naturaleza animada. En el láser, por ejemplo, también se da el caso de que puedan aparecer distintas ondas luminosas simultáneas sin que entren en competencia, si reciben su energía de átomos distintos. El

tema de la lucha competitiva también desempeña un papel decisivo en la vida laboral y económica. Hablaremos de ello más adelante.

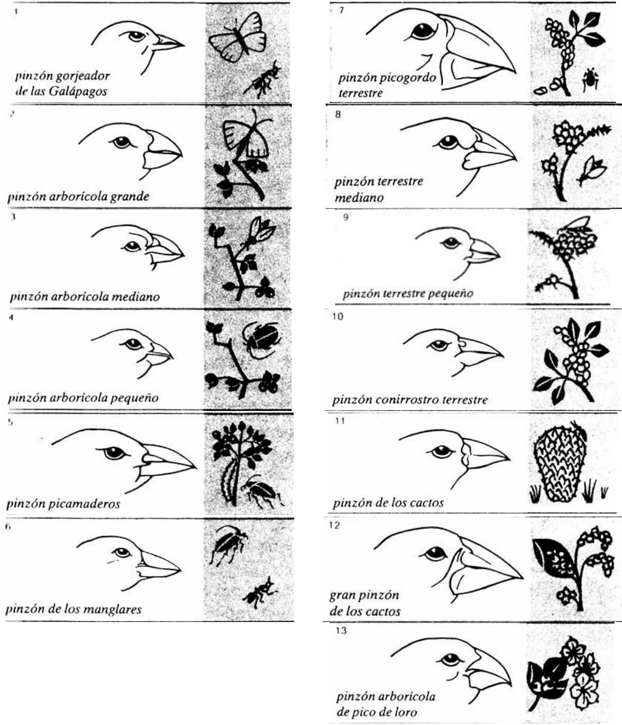


Fig. 8.1: ejemplos de distintas formas de picos de pájaros (pinzones) que nos muestran la elevada especialización de los picos para distintos fines. A la vez se representa simbólicamente el alimento ingerido por cada clase. En las Galápagos los pinzones, aislados del resto del mundo, han producido muy diversas formas de picos. Se formaron nuevas razas, pero no nuevas especies: continuaron siendo pinzones. Darwin los describió el primero; aquí se reproducen según K. Lorenz.

1 = insectívoro; 2-6 = predominantemente insectívoros; 7-12 = predominantemente herbívoros; 13 = herbívoros.

Es interesante destacar que la naturaleza no sólo ofrece ejemplos de supervivencia por especialización, sino también por generalización: hay especies animales, como el jabalí, capaces de ingerir una amplia gama de alimentos.

Un ejemplo especialmente interesante de supervivencia en la ruda lucha por la vida nos lo da la simbiosis, en la cual, dos especies muy distintas se ayudan mutuamente; más aún, sólo el concurso de cada una de ellas permite la existencia de la otra. La naturaleza nos ofrece todo un abanico de ejemplos en este sentido: las abejas, que se alimentan del néctar de las flores y transportan al mismo tiempo el polen, con lo cual se ocupan de la fecundación y, por consiguiente, de la reproducción de sus sustentadoras; ciertos pájaros que entran volando en la boca abierta de los cocodrilos para «limpiarles» los dientes; hormigas que mantienen pulgones como «vacas lecheras», etc. El árbol calvario, del que vivía el pájaro dodo, se extinguirá —o eso se creía—, porque únicamente el dodo era capaz de preparar, digiriéndola, la semilla del árbol de modo que pudiera brotar, y esa ave desapareció. (Según informes recientes, sin embargo, unos biólogos habrían descubierto que también los pavos pueden preparar las semillas de este árbol capaz de vivir varios siglos).

Estas observaciones particulares no deben hacernos perder de vista el cuadro general. En efecto, normalmente no son de ninguna manera sólo dos o tres las especies animales que compiten o viven en simbiosis. Muy al contrario, los fenómenos naturales están extremadamente intervinculados. En este sentido, la naturaleza es un sistema sinergético de altísima complejidad. También aquí vuelve a cobrar una importancia fundamental la cuestión de si los diversos fenómenos naturales interrelacionados pueden conducir a un equilibrio. Todos hemos oído hablar últimamente del equilibrio ecológico, cada vez más perturbado por la intervención del hombre. Seguramente sólo las investigaciones más recientes nos han hecho comprender que, aun sin intervención humana, el equilibrio ecológico o biológico no es, ni mucho menos, tan perfecto como nos había parecido durante mucho tiempo.

Al hablar de equilibrio solemos pensar en un equilibrio estático, en el cual el número de determinada especie de aves, por ejemplo, permanece prácticamente igual en el curso del tiempo. Pero en la naturaleza no siempre sucede así. Todos sabemos que las catástrofes naturales pueden provocar

cambios: un invierno demasiado crudo, un verano demasiado caluroso y seco o una helada en la que mueran las flores pueden dejar sin alimento a los animales (p. ej., a las abejas).

Otro caso en que el equilibrio puede desorganizarse es el de la aparición de plagas, como una plaga de ratones o de abejorros, que tendrán luego consecuencias devastadoras para otros seres vivientes.

Pero prescindamos de momento de esta cuestión. Incluso después de una catástrofe natural nos parece evidente que se restablecerá el equilibrio anterior. Como veremos más adelante, la tesis de la economía de mercado se basa en una suposición análoga.

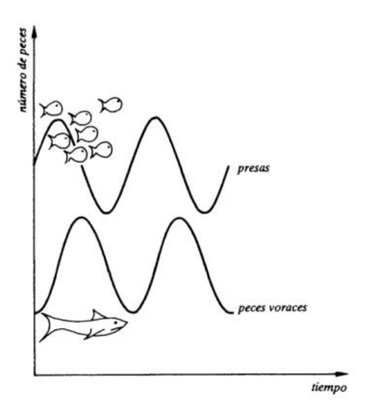


Fig. 8.2: esta gráfica muestra la fluctuación del número de peces voraces y sus víctimas en función del tiempo (cf. texto).

Sin embargo, ¿es realmente tan estable la naturaleza? Hay múltiples ejemplos de que en la naturaleza no prevalecen de ninguna manera los equilibrios estáticos. A comienzos del siglo XX unos pescadores del mar Adriático comprobaron que sus pescas fluctuaban rítmicamente. Pronto se descubrió que ese fenómeno se basaba en una fluctuación rítmica de la población de peces (fig. 8.2). En los años veinte, dos matemáticos de prestigio, A. J. Lotka y V. Volterra (1860-1940), lograron dar por separado una explicación matemática del hecho. Según se comprobó, el fenómeno tiene lugar gracias a la presencia de dos especies de peces: una de ellas son peces voraces; la otra, peces que son presa de los anteriores. El mecanismo de las fluctuaciones periódicas es el siguiente: en un momento dado hay pocos peces voraces, y los otros pueden multiplicarse sin problemas. Pero enton-

ces los peces voraces encuentran más víctimas y también pueden reproducirse en número creciente. Por fin, la población de peces voraces es tan grande que causa estragos entre sus víctimas, con lo cual el número de peces voraces naturalmente tiene que volver a disminuir, y puede recomenzar el ciclo.

Según el modelo matemático existe la posibilidad de que los peces voraces se coman casualmente todos los otros peces, condenándose así ellos mismos a la desaparición. La naturaleza evita ese proceso: tiene preparados unos refugios en que las víctimas están a salvo de los rapiñadores.

Un ciclo parecido se ha constatado en el Canadá, en el caso de las liebres de los Alpes que son devoradas por linces (fig. 8.3). Dado que las tasas de reproducción y mortalidad naturalmente también están sometidas a otras influencias, los modelos que aquí se describen suelen estar expuestos a críticas. No obstante, vemos que en la naturaleza los equilibrios no tienen por qué ser estáticos.

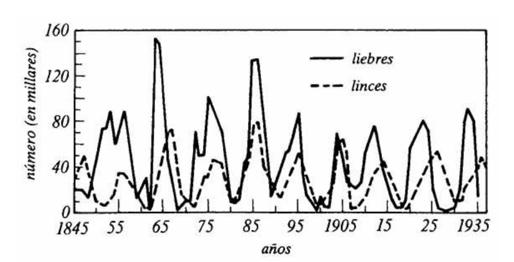


Fig. 8.3: la evolución periódica de la población de liebres de los Alpes y linces.

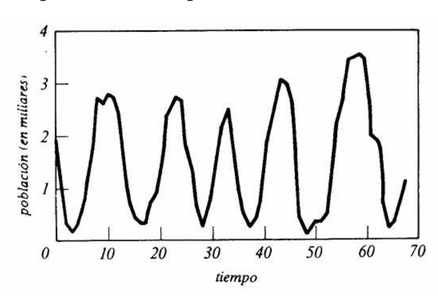


Fig. 8.4: fluctuaciones temporales de una población de insectos.

Estas circunstancias son aún más pronunciadas en algunas poblaciones de insectos cuyo número fluctúa de manera completamente irregular. Más adelante veremos que en la actualidad se dispone de modelos matemáticos mediante los cuales podemos expresar rigurosamente incluso fenómenos que parecen del todo irregulares (fig. 8.4).

Estos ejemplos ya indican que la idea de un equilibrio biológico estático es demasiado ingenua. Por otra parte debemos tener muy presente que cuando realmente se ha establecido un equilibrio, éste es muy sensible, y con ello volvemos a una de las tesis fundamentales de la sinergética.

Recordemos que una serie de ejemplos físicos y químicos de los capítulos anteriores nos mostraban que, en ciertos puntos críticos, hasta cambios mínimos de las condiciones del entorno pueden provocar cambios dramáticos a nivel macroscópico. En aquellos ejemplos observábamos siempre unas variaciones en las condiciones del entorno, que hacían alcanzar a los sistemas un grado más elevado de orden. Desde luego, todos estos fenómenos se pueden considerar también en sentido contrario, es decir la destrucción de un orden establecido por pequeñas modificaciones del entorno.

Numerosos fenómenos que tienen lugar entre las poblaciones animales pueden describirse en términos matemáticos, lo cual permite aplicar los métodos matemáticos de la sinergética a estos problemas. En este nivel matemático se pueden establecer entonces profundas analogías entre fenómenos de la naturaleza animada y la inanimada. Los resultados se pueden formular en pocas palabras. Informan que también en la naturaleza animada unas variaciones mínimas en las circunstancias ambientales suelen crear estados de orden absolutamente distintos, es decir, distribuciones completamente nuevas de las distintas especies. Un hecho que ya salta a la vista cuando observamos la distribución de las más diversas plantas en las montañas. A menudo pueden verse nítidas líneas de altitud que constituyen la frontera entre distintas franjas de plantas, de manera muy similar a lo que sucede con las zonas climáticas de la tierra. Este ejemplo nos muestra que determinadas plantas prevalecen sobre otras, y lo hacen de forma casi repentina si se modifica muy ligeramente la temperatura media anual, por ejemplo. Lo mismo podemos esperar si modificamos el medio ambiente a través de intervenciones artificiales. Cuando se canalizan las aguas residua-

les hacia un río, podría esperarse ingenuamente, que un aumento de la contaminación en un diez por ciento se traduzca en una disminución de un diez por ciento en el número de peces. Pero, en realidad, en los puntos críticos puede suceder que un aumento insignificante de la contaminación lleve a la completa extinción de las poblaciones de peces o, en otras palabras, que el agua dé un vuelco, que pierda el equilibrio. Aquí se manifiesta con especial nitidez un principio fundamental de la sinergética con el que nos encontraremos una y otra vez, a saber, que en determinados puntos de inestabilidad incluso cambios muy pequeños del entorno pueden provocar modificaciones muy dramáticas en el propio sistema.

Para terminar, volvamos a la naturaleza. También en ella cambian las condiciones ambientales, a causa de variaciones climáticas, por ejemplo. De lo ya expuesto debería quedar claro que hasta un cambio climático insignificante es capaz de poner en marcha procesos de selección fundamentalmente nuevos, con lo cual se verá «impulsada» la evolución.

Sin embargo, el «impulso de la evolución» no significa que las nuevas especies que se desarrollen sean objetivamente mejores que las desplazadas. Meramente se adecúan mejor a las nuevas condiciones de vida. En ese proceso también pueden darse modificaciones que podrían catalogarse como involuciones. Hay seres vivientes complejos que pueden ser sustituidos por otros de estructura más simple. Ello puede suceder incluso a nivel de las biomoléculas: en nuevas condiciones ambientales se despojan de una parte de los rasgos hereditarios, porque no los necesitan e incluso pueden multiplicarse más velozmente sin ellos. Este tipo de experimentos fue realizado por Sol Spiegelmann, con biomoléculas del ARN (ácido ribonucleico) de determinadas hayas.

A pesar de que en la naturaleza animada se trata de procesos muy distintos a los observados en las reacciones químicas, el láser o un líquido, en ellos se manifiestan los mismos principios básicos. El papel del ordenador es asumido por las respectivas especies y estos ordenadores pueden competir, cooperar o coexistir.

Pequeños cambios de las condiciones ambientales pueden otorgar el protagonismo a nuevos ordenadores o sistemas de ordenadores. Ciertamente, en cada caso es preciso que primero se origine un nuevo ordenador; en el caso que nos ocupa, una nueva especie. En el láser esto se concretaba en la formación espontánea de una onda luminosa; en los movimientos de

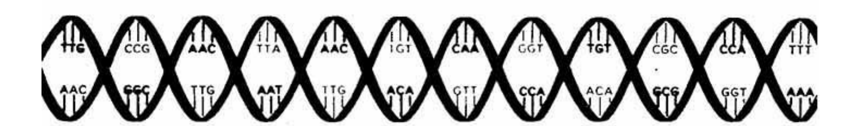
los líquidos, en una pequeña fluctuación térmica; en las reacciones químicas, en una reacción inicial o la formación espontánea de una nueva molécula. Aquí se destaca una vez más la interrelación entre azar y necesidad. Los cambios ambientales crean condiciones en las que pueden imponerse nuevos estados de orden prescritos por el ordenador correspondiente. Pero ante todo debe originarse una nueva especie producto de un azar; en biología, de una mutación. O puede suceder que una especie rara (que, por ejemplo, ocupaba una nicho ecológico) de pronto pueda multiplicarse y devenir dominante.

Igual que en todos los casos anteriores existe una peculiar relación entre el ordenador y el individuo. El siguiente ejemplo la ilustra muy bien. En una serie de casos, puede adjudicarse al ordenador una magnitud matemática simple: el número de individuos de una especie. La variación temporal de este número puede averiguarse mediante mediciones, y en algunos casos es posible calcularla de antemano. Tras estas cifras se ocultan innumerables destinos individuales que el ordenador, el número de seres, determina sólo globalmente, pero con implacable rigor. Si un país subdesarrollado dispone en cierto momento de menos alimentos que los necesarios para la subsistencia de cada individuo, el número de habitantes, es decir, el ordenador, tendrá que disminuir, sin que se especifique sobre quién recaerá ese cruel destino. Algo similar ocurre en la vida económica, por ejemplo, con los despidos, o en el Estado. En general, sólo pueden hacerse afirmaciones acerca de los ordenadores, pero no sobre el destino indirecto de los implicados; más adelante volveremos repetidamente sobre esta cuestión.

IX. ¿COMO SE FORMAN LOS ORGANISMOS BIOLÓGICOS?

Herencia a través de moléculas

En el capítulo anterior nos ocupábamos de la naturaleza animada en general, de la dinámica de la interacción de los seres vivientes más diversos. Ocupémonos ahora de los seres mismos. Mientras que los seres vivientes nos sorprenden con la variedad de sus formas, los que pertenecen a la misma especie se caracterizan por la constancia de su forma de reproducirse. Por tanto, las formas deben originarse de una manera estrictamente regulada. Pero, ¿cómo pueden nacer las formas?, ¿cómo puede regularse su constitución? La respuesta más simple sería remitirnos a la herencia. Actualmente sabemos que ciertas características físicas, y sin duda también psíquicas, se heredan a través de un portador material, a saber, una sustancia química privativa de cada especie. Los químicos han designado esta sustancia con el complicado nombre de ácido desoxirribonucleico, abreviadamente, ADN. Éste consiste en dos cordones de moléculas entrelazadas en espiral, por lo que también se lo denomina «doble hélice» (fig. 9.1). En cada cordón de moléculas suelen estar ensartadas, aparentemente sin orden ni concierto, cuatro clases distintas de moléculas, como en un collar con cuatro tipos distintos de perlas (fig. 9.2). Estas cuatro clases de moléculas llevan nombres incomprensibles para la mayoría de nosotros y las representaremos por sus iniciales: A (adenina), C (citosina), G (guanina) y T (timina). Ahora podemos olvidar tranquilamente los nombres. Si a cada clase de molécula le correspondiera un color, obtendríamos un collar de perlas variopinto.



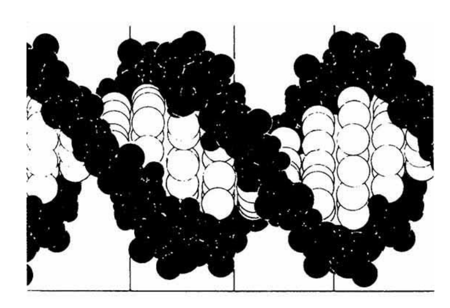


Fig. 9.1: los cordones de moléculas del ADN ordenados en doble hélice. *Arriba*: sección longitudinal; *al costado:* proyección en perspectiva.

En la célula, el ADN es «recopiado» a través de un proceso similar a la transformación de un negativo de película fotográfica en copia positiva y se forma químicamente el ácido ribonucleico, ARN. Cada una de las moléculas A, C, G y T da origen a una nueva molécula:

ADN	ARN
A	U (Uracilo)
C	G
T	A

Según se ha comprobado, las nuevas moléculas se agrupan de tres en tres; por ejemplo:

GAU, CCU, GCU, UUU

Constituyen así una palabra clave, un signo de un código para la incorporación de determinado «aminoácido» (fig. 9.3).

La serie GAU-CCU-GCU-UUU presente en determinado ARN representa, por tanto, una orden escrita dirigida a la célula: «construye una proteína comenzando por el ácido aspártico; sigue con la alanina, etcétera». El ARN gobierna así la estructuración material de la célula.

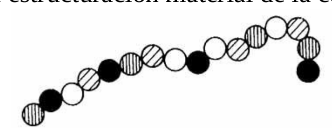


Fig. 9.2: a lo largo de un cordón molecular distintas clases de moléculas están ordenadas como perlas enhebradas en un collar.

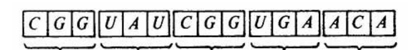


Fig. 9.3: ejemplos de codones de tres moléculas cada uno.

Para no desviarnos de nuestro tema central tendremos que dejar de lado numerosos detalles importantes de este proceso; pero recordemos que cada tríada formada por moléculas A, C, G, U es una unidad de información, una palabra clave o, como también se la suele llamar, un codón. Según el ser viviente del que se trate, el ADN o el ARN contienen desde algunas docenas hasta muchos millones de codones. Pueden llenar una página, pero también un libro entero, como en el caso del ADN humano (fig. 9.4).

Se impone la idea de que el ADN va transportando las instrucciones (el plan de ejecución de las obras, por decirlo así) de un organismo a otro. Otra imagen: es como una cinta grabada que reproduce una melodía.

No obstante, si consideramos más detenidamente esta idea de la herencia, aparecen ciertos problemas. Cuando se quiere realizar un plan de ejecución de obras se necesitan instrucciones precisas que deberían estar consignadas en el plan. Por ejemplo, debería figurar dónde debe situarse cada célula del organismo en formación y qué propiedades tiene que tener. Y si contamos el número de instrucciones o, para emplear el lenguaje técnico, la cantidad de información necesaria para construir el organismo, muy pronto obtendremos un número muy superior al que podría almacenar el ADN. Si volvemos a comparar el ADN con un libro, en el caso del hombre, por ejemplo, se necesitaría una biblioteca inmensa. Luego, la naturaleza debe haber desarrollado métodos que le permitan arreglárselas con mucha menos información y no obstante ejecutar su plan. Debe haber leyes naturales que regulen la formación de un organismo a partir de un ADN dado.

Para seguir con nuestra comparación anterior, el ADN es como una cinta magnetofónica en la que hay almacenadas señales magnéticas. Pero nos falta encontrar la analogía con el magnetófono, que finalmente convierta las señales en una melodía. Con una diferencia decisiva: todo parece indicar que la naturaleza transforma las señales del ADN de un modo increíblemente sutil; es como si sólo impusiera el tema de la pieza musical, dejando su ejecución en cada caso en manos del aparato, es decir, del organismo que está creciendo. Pero con ello queda en entredicho la afirmación de que el ADN contiene una información bien determinada. Todo depende del medio en que el ADN (o el ARN) «toque» su tema musical. En el caso

extremo de que coloquemos el ADN o el ARN en un montón de arena, no pasará nada. En cambio, incluso ciertos fragmentos de estas sustancias pueden «esclavizar» determinadas bacterias obligándolas a producir insulina.

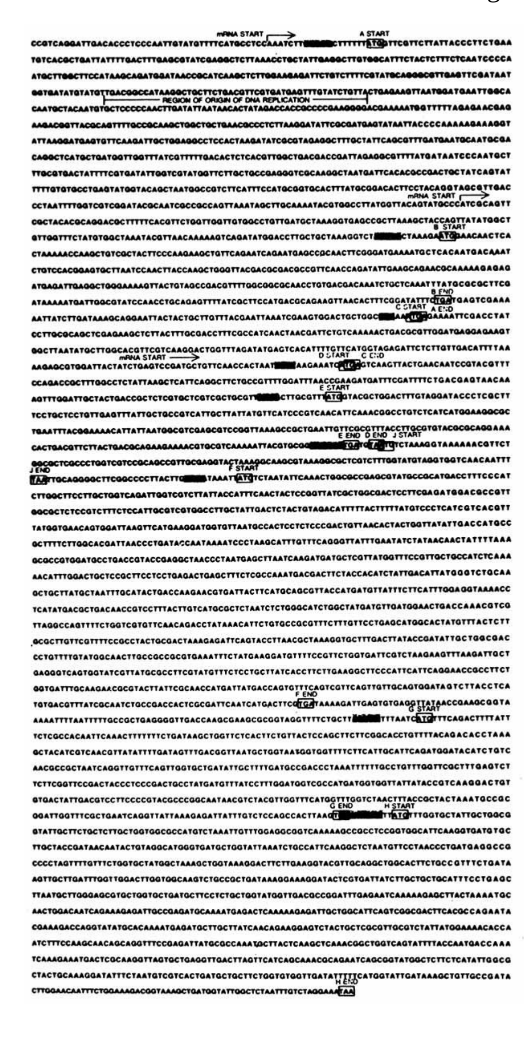


Fig. 9.4: ejemplo de la cadena de ADN de un virus.

Ejemplos modelo de configuraciones biológicas

Antes de profundizar en estas cuestiones, detengámonos a analizar nuevamente unos experimentos que nos permitan dilucidar los mecanismos del desarrollo de formas u órganos. La biología, como todas las demás ciencias, se sirve para ello de determinados sistemas modelo cuyas propiedades pueden estudiarse con relativa facilidad. Dos ejemplos especialmente conocidos son los mixocelos y la hidra.

Por lo general, el mixocelo se presenta en forma de células aisladas, con características de amebas, que viven sobre el subsuelo. Cuando el alimento se vuelve escaso para las células aisladas, éstas de pronto se reúnen en determinado punto, como movidas por una voz de mando secreta; allí van acumulándose, hasta diferenciarse en un tallo y un portador de esporos (fig. 9.5). Entonces el mixocelo puede moverse además como un todo, retorciéndose sobre el suelo como una serpiente (fig. 9.6). La primera fase de amontonamiento ya es sumamente interesante. ¿Cómo saben las distintas células que tienen que juntarse y dónde tienen que hacerlo? Los biólogos descubrieron que las células pueden producir y segregar una sustancia llamada adenosina mono-fosfato cíclica (cAMP). Ahora bien, si una célula es alcanzada por el cAMP de otra, la primera puede segregar cAMP en mayor cantidad. La acción conjunta de este efecto de refuerzo, por una parte, y la difusión por otra, lleva a la formación de dibujos de ondas o espirales químicas (fig. 9.7). Las diversas células pueden medir el gradiente de densidad de las respectivas ondas de cAMP y moverse en sentido contrario al gradiente. Para ello utilizan pequeños divertículos con los que reman a través del líquido.

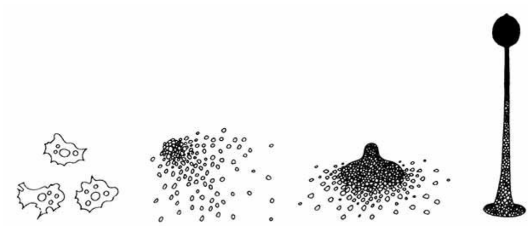


Fig. 9.5: representación esquemática de la formación del mixocelo a partir de la evolución de amebas individuales.

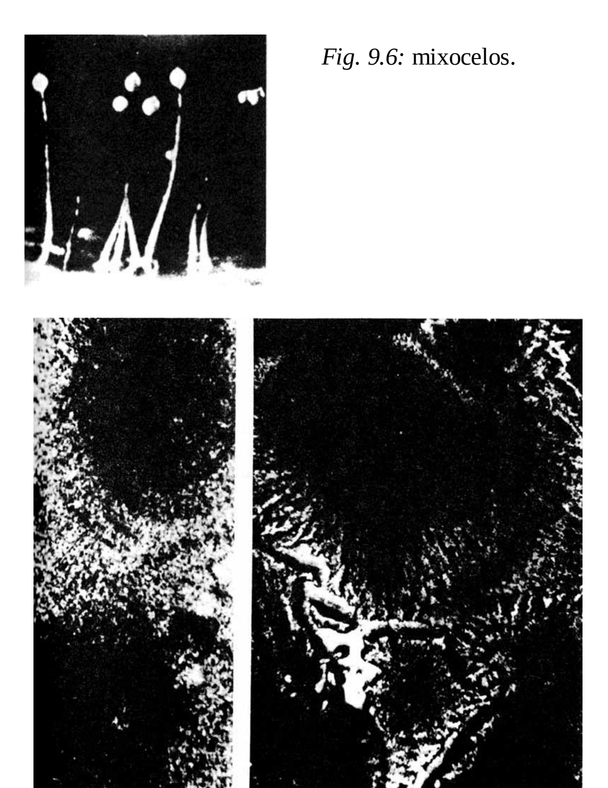


Fig. 9.6: mixocelos.

Fig. 9.7: las ondas en espiral de cAMP, a) y b).

Este ejemplo nos muestra con toda claridad que las formaciones de dibujos, como espirales o círculos concéntricos, pueden desarrollarse en la naturaleza animada (aquí, en la formación de los mixocelos) de manera totalmente análoga a lo que ocurre en ciertas reacciones químicas en la naturaleza inanimada. La causa última de que así suceda es que, en las formaciones de dibujos, los ordenadores que describen el orden macroscópico, se basan siempre en las mismas normas.

Una vez reunidas estas células iguales se inicia un nuevo fenómeno que se puede observar claramente, pero cuyas causas todavía no se han podido

explicar del todo. Las células quedan unidas, pero en uno de los lados del agrupamiento se transforman en tallo, mientras que en el otro se convierten en portadores de esporos; se establece, por tanto, una diferencia entre las células. Según parece, el cAMP también desempeña un papel decisivo en este proceso de diferenciación, pero aún no han concluido las investigaciones al respecto. Sea como fuere, este ejemplo evidencia que las distintas células se comunican por medio de una sustancia química. Esta conclusión nos ayudará a comprender la formación de los dibujos en sí.

Un ejemplo muy conocido es el de la hidra. Se trata de un pólipo de agua dulce que mide unos pocos milímetros y está formado por algunos cientos de miles de células de unos doce tipos distintos. La hidra tiene una cabeza y un pie. La cuestión que queremos estudiar aquí es cómo logra saber un conjunto de células previamente indiferenciadas dónde debe formar la cabeza o el pie. Si partiéramos de la idea (ya comentada) de un plan de construcción previo, podríamos suponer que cada célula tiene instrucciones previas y sabe de antemano si tendrá que convertirse en pie o en cabeza, por ejemplo.

Sin embargo, podemos realizar el siguiente experimento (fig. 9.8): si cortamos la hidra por la mitad, se formarán dos animalillos; en el que ya poseía una cabeza se regenerará un pie y viceversa. Lo cual significa que células iguales pueden dar lugar a órganos completamente distintos. Por tanto, deben recibir de algún modo instrucciones del agrupamiento de células, que les indiquen si se encuentran en el extremo destinado a la cabeza o en el que debe convertirse en pie. En otras palabras, las células tienen que poder obtener información sobre su posición en el agrupamiento de células. ¿Mediante qué mecanismos? Podremos deducirlos de otros experimentos que detallaremos a continuación.

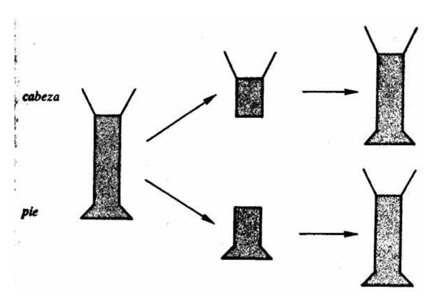


Fig. 9.8: esquema de la regeneración de la hidra.
Izq.: animalillo intacto con cabeza.
Centro: las dos partes de la hidra cortada.
Der.: regeneración del pie (abajo) y de la cabeza (arriba).

Trasplantemos una parte de la cabeza de una hidra a la parte central de otra hidra; si la parte trasplantada está cerca de la cabeza, involucionará. Pero si está lo suficientemente alejada, se desarrollará hasta convertirse en otra cabeza. Es evidente que las células deben poder comunicarse a bastante distancia, concretamente en el sentido de que una cabeza ya existente pueda evitar que en sus inmediaciones se forme una segunda cabeza.

Dibujos macroscópicos sobre una base molecular

El ejemplo del mixocelo nos mostraba cómo pueden comunicarse células bastante distantes entre sí: a través de sustancias químicas que se difunden. Algunos matemáticos (A. M. Turing) ya propusieron hace tiempo modelos para explicar la diferenciación de las células. Observemos dos células que por de pronto están separadas y en las que tienen lugar los mismos procesos químicos (fig. 9.9). Éstos generan una clase de moléculas, que llamaremos A, las cuales vuelven a desintegrarse en parte, de modo que finalmente se forma una concentración de equilibrio. Naturalmente, esta concentración es la misma en ambas células. Ahora permitiremos que las sustancias puedan pasar en ambos sentidos de una célula a la otra (fig. 9.10). A causa de este intercambio de sustancias, el estado de igual concentración en ambas células puede llegar a ser inestable. La mejor manera de ilustrarlo es, una vez más, el modelo de una esfera entre colinas, es decir, un curva sinergética. Si la esfera rueda hacia la izquierda, ello significa que aumenta la concentración de moléculas A en la célula izquierda; en el caso contrario, aumenta en la célula derecha. Una pequeña fluctuación inicial en la producción de las moléculas A decide cuál de las células obtendrá una concentración más elevada. Mientras que en las células separadas la concentración era igual y, por tanto, las moléculas A estaban distribuidas de manera *simétrica* entre ambas células, en las células acopladas esta distribución es asimétrica; se ha roto la simetría. Este tipo de ruptura de la simetría *espacial* ha adquirido gran importancia en las modernas teorías de la constitución de las formas. Una serie de investigadores ha seguido trabajando sobre la idea fundamental de Turing, diseñando modelos de procesos químicos en los que intervengan muchas células. Dicho con mayor precisión, han investigado procesos que tienen lugar en un *continuum.*

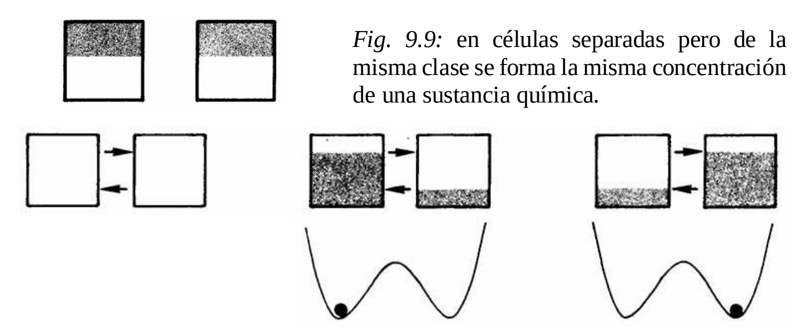


Fig. 9.9: en células separadas pero de la misma clase se forma la misma concentración de una sustancia química.

Fig. 9.10: ahora se juntan las células de la fig. 9.9, lo cual posibilita un intercambio de sustancias entre las células. Este intercambio de sustancias, junto con los procesos en el interior de cada célula, lleva a una distribución no homogénea de las concentraciones de sustancia. La ruptura de la simetría está simbolizada una vez más por las dos posiciones en una esfera en un recipiente de dos hondonadas.

Alfred Gierer y Hans Meinhardt di aron un modelo matemático detallado que puede explicar, por ejemplo, la formación de la cabeza y el pie de la hidra. El modelo aborda en particular la cuestión de cómo pueden formarse una cabeza y un pie en los extremos de un complejo celular inicialmente alargado e indiferenciado. Imaginemos un complejo de células inicialmente indiferenciadas, en el que se producen dos sustancias de distinta naturaleza. Primeramente, una sustancia que induzca la formación de la cabeza, por lo cual la llamaremos sustancia inductora. Pero acabamos de ver que también se puede impedir la formación de la cabeza, de modo que postularemos la existencia de una segunda sustancia, que impida o inhiba esa formación, y a la cual denominaremos «sustancia inhibidora».

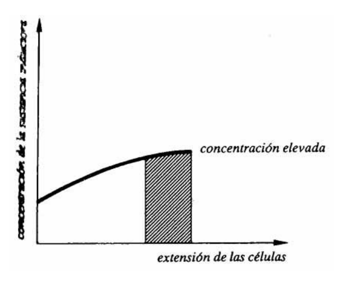


Fig. 9.11: ejemplo de la distribución de la concentración de biomoléculas. A la izquierda: baja concentración; a la derecha: concentración elevada.

Supongamos ahora que al principio las células agrupadas producen regularmente sustancias inductoras y eventualmente también sustancias inhibidoras, las cuales pueden difundirse en el complejo celular y, además, reaccionan entre sí. Luego, igual que en nuestro capítulo acerca de los procesos químicos, tendremos que investigar nuevamente la acción combinada de procesos de reacción y difusión. No nos sorprenderá ya encontrarnos también en este caso con un dibujo químico, cuando la producción de sustancia inductora, por ejemplo, alcanza determinados valores críticos. En otras palabras, se formará un desnivel de concentración, que debe de ser el dibujo más sencillo concebible (fig. 9.11). De acuerdo a las actuales nociones, una elevada concentración de la sustancia inductora será capaz de activar los genes de las células individuales que allí se encuentren, los cuales causarán a su vez la diferenciación de las células que formarán la cabeza. Este tipo de procesos encaja perfectamente con el esquema general de la sinergética. El dibujo químico que finalmente se forma es el ordenador, el cual, por una parte, se crea por la interacción de las sustancias químicas, pero al mismo tiempo, gobierna el desarrollo de los distintos procesos químicos en vistas a formar ese dibujo específico.

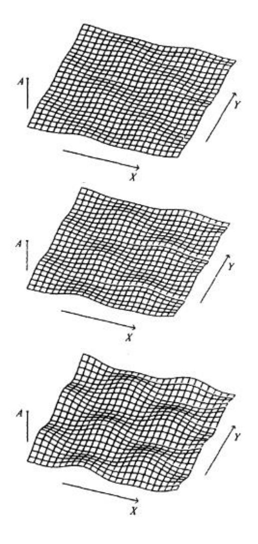
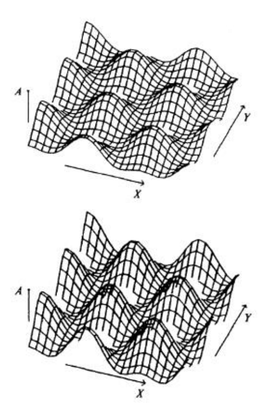


Fig. 9.12: en estos dibujos se representa la concentración de la sustancia inductora en un complejo celular bidimensional. Mediante un modelo matemático se analiza cómo aumenta la concentración de la sustancia con el tiempo y va formando así un dibujo.



Igual que en todos los ejemplos anteriores, el ordenador se puede representar de dos maneras diferentes: por un lado, mediante el dibujo espacial (o temporal) directamente accesible a nuestra observación; por el otro, mediante cálculos exactos. En efecto, en cuanto describimos los procesos fundamentales a través de las ya mencionadas ecuaciones de reacción-difusión, los métodos de la sinergética nos indican la distribución de la concentración que va formándose. La sinergética también muestra que desarrollos de reacciones completamente distintos pueden dar lugar al mismo dibujo espacial (fig. 9.12).

Durante algún tiempo las sustancias inductoras e inhibidoras aquí postuladas parecieron meras hipótesis, pero entretanto se ha podido comprobar experimentalmente su existencia. Concretamente, se ha constatado que existen sendas sustancias inductoras e inhibidoras para la cabeza y el pie de la hidra. Este tipo de sustancias parece estar muy difundido en la naturaleza. También se las encontró en la anémona de mar, e incluso desempeñan un papel decisivo en la formación del sistema nervioso de los mamíferos. Tiempo atrás se había encontrado ya un factor de crecimiento de los nervios, que es segregado por las células y se difunde luego a través del tejido celular. Esta sustancia es capaz de atraer en cierto modo a los nervios con origen en otro complejo celular y orientar su crecimiento, hacia una zona exterior del cuerpo, por ejemplo.

El principio fundamental de las sustancias inductora e inhibidora y de la regulación de la formación de dibujos mediante ordenadores macroscópicos permite comprender, al menos en principio, muchas fenómenos, como la formación de las rayas en las cebras y la gemiparidad en los tallos (fig. 9.13). Pero sin duda representa sólo el comienzo de una larga evolución científica; pensemos en lo que implicará comprender la formación de órganos complejos, como por ejemplo el corazón o el ojo.

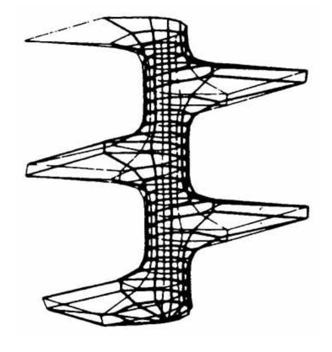


Fig. 9.13: ejemplo de un modelo matemático de la gemiparidad en un tallo.

Los ejemplos anteriores evidencian que la naturaleza procede de una manera mucho más sutil de lo que inicialmente se suponía al considerar el plan de construcción contenido en el ADN. Permite que las distintas partes de un organismo en crecimiento se intercomuniquen y coordinen mutuamente. Es probable que este procedimiento también se aplique en la formación de al menos ciertas partes del cerebro, tema que trataremos en el capítulo 14. Tampoco en este caso las partes se forman, ni mucho menos, siguiendo un plan de construcción prefijado como el que observaríamos para armar un aparato electrónico.

Los procesos de autoorganización también intervienen en la formación de los cordones nerviosos entre los órganos sensoriales y el cerebro. Así lo indican experiencias en las que se ha cortado el conducto nervioso entre el ojo y el cerebro de una rana, permitiendo luego que el conducto vuelva a crecer hasta cerrarse nuevamente, pero de manera que una parte del cerebro obtenga una imagen invertida. Al poco tiempo la rana vuelve a ver bien, como puede deducirse de su comportamiento al atrapar moscas, por ejemplo. Las conexiones deben haber modificado su funcionamiento de manera

que el esquema de transmisión producido vuelve a ser uniforme y «correcto».

El problema fundamental anejo es averiguar cómo se conectan, ya durante el crecimiento, las células ópticas con las correspondientes células nerviosas del cerebro. Una discusión más detallada de los experimentos reseñados demuestra que las conexiones del ojo con el cerebro se organizan a sí mismas. A través de los cálculos de un modelo de Christoph von der Malsburg se ve que también aquí interviene un principio de competencia: las pequeñas zonas que ya dan una imagen correcta se refuerzan, mientras se van suprimiendo otras fibras nerviosas que proporcionan una imagen falsa. En este contexto, lo correcto y lo falso se determina en función de que los entornos de una zona del ojo se reflejen, o no, en una zona continua correspondiente del cerebro. Por tanto, la cooperación y la coexistencia, al igual que la lucha competitiva, no son de ninguna manera fenómenos limitados al reino animal macroscópico. El desarrollo de cada organismo individual también responde a este principio fundamental.

X. A VECES SON INEVITABLES LOS CONFLICTOS

En los ejemplos de la física nos llamaba la atención una extraña circunstancia, siempre repetida: al constituirse un nuevo estado ordenado, la naturaleza ofrece varias opciones al sistema. Por ejemplo, si en un líquido calentado desde abajo se forma un dibujo de flujos de circulación, los «rollos» correspondientes pueden girar tanto en el sentido de las agujas del reloj como a la inversa. Como ya hemos visto, este comportamiento puede explicarse con un sencillo modelo mecánico.

Si colocamos una esfera en un recipiente como el esquematizado en la figura 10.1, ésta caerá de su posición inestable a otra posición, pero las alternativas izquierda y derecha están en completa igualdad de condiciones. La simetría existente tendrá que quedar rota por la posición que finalmente ocupe la esfera.

Si se nos pidiera que determináramos su posición final, no obtendríamos una solución unívoca. A todas luces existen dos soluciones completamente equivalentes, lo cual contradice nuestra idea habitual de que todo problema debe tener una solución única y definida.

Una experiencia sencilla que podemos llevar a cabo con nosotros mismos nos permitirá verificar que este tipo de problemas no surge sólo en la mecánica o en fenómenos naturales simples.

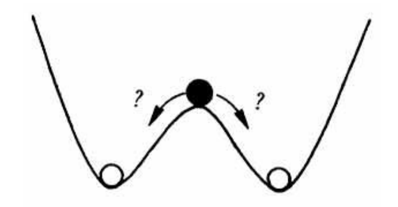


Fig. 10.1: ya conocemos bien este modelo de un problema que tiene dos soluciones equivalentes. ¿Hacia dónde rueda la esfera?

Nuestro cerebro es indudablemente el sistema más complejo creado por la naturaleza. También en él se presenta el fenómeno de la ruptura de simetrías, por ejemplo en la percepción. Si miramos la fig. 10.2 es probable que al principio no nos sugiera absolutamente nada. Pero si nos dan la información adicional de que debemos contemplar la parte blanca central como primer plano, inmediatamente reconoceremos un jarrón. Si nos dicen en

cambio que el primer plano lo constituyen las partes negras, veremos dos caras de perfil. Por consiguiente, la imagen original era ambigua en cuanto a su contenido perceptible, y ninguno de los contenidos («jarrón» o «caras») se destacaba respecto al otro. Una gran parte de los cuadros del ahora famoso artista M. C. Escher se basan en esta ruptura de la simetría. La fig. 10.3 muestra una de sus numerosas obras, en la que podemos reconocer ora ángeles, ora diablos. Según se desprende de estos ejemplos, para quebrar la simetría de la percepción necesitamos una información adicional, como la de «considerar la parte blanca como primer plano». Pero aun careciendo de información adicional proveniente del exterior solemos ser capaces de romper la simetría. En nuestro cerebro tiene lugar un proceso que podríamos llamar «fluctuación», por su analogía con fenómenos de la física hidráulica, por ejemplo. La imagen aparece súbitamente en nuestra percepción. Es como si tuviéramos una repentina iluminación.

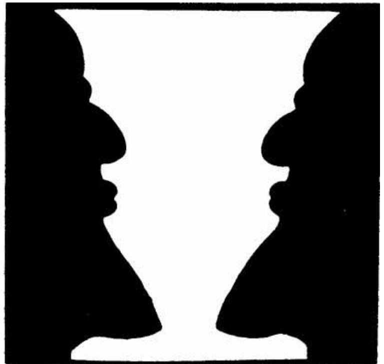


Fig. 10.2: ¿jarrón o caras?

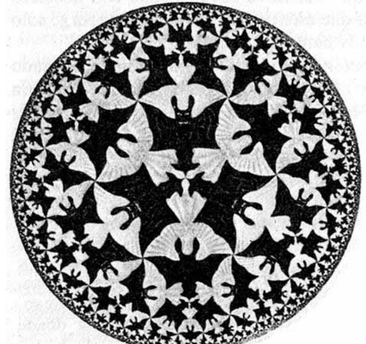


Fig. 10.3: ¿ángeles o diablos?

Compruebe su estado anímico

En nuestro cerebro, las simetrías pueden estar rotas a priori por una impronta psicológica, es decir, por una especie de prejuicio inconsciente. En ese hecho se basan una serie de tests psicológicos.

Un ejemplo que el propio lector puede verificar es el de las caras de la figura, 10.4. ¿Denotan tristeza o alegría? ¿Existe alguna relación entre las

dos mujeres? ¿De qué tipo? Observe primero las imágenes y luego formule su juicio. De hecho están dibujadas de manera que su expresión sea neutra, es decir, ni triste ni alegre. Pero en un test, que exige una decisión, debe romperse la simetría interna, lo cual sólo se logra con una información adicional, que en este caso provendrá de la propia persona sujeto de la prueba. Esta ya se encuentra a priori en determinado estado anímico y lo proyectará sobre las personas de la imagen. En base a estos tests, el psicólogo puede sacar conclusiones acerca del estado de ánimo de la persona examinada.



Fig. 10.4: solemos proyectar nuestros propios estados de ánimo sobre rostros inexpresivos u oraciones neutrales. Imagen del test de apercepción temática desarrollado en 1935 por Henry Murray y sus colaboradores en el Instituto de Psicología Clínica de la Universidad de Harvard. De manera similar al test de Rorschach, con este test proyectivo se pretendía descubrir conflictos y pensamientos inconscientes.

Este fenómeno también pude describirse en otros términos. En las imágenes veremos que ya estábamos predispuestos a ver en nuestro fuero íntimo. En realidad estamos constantemente sometidos a ese tipo de ideas preconcebidas. A menudo, en un texto escrito u oral «leemos» precisamente lo que de él esperamos. Lo cual, en cierto sentido, incluso es necesario; pues comprender significa relacionar las experiencias nuevas con lo ya registrado como «experiencia».

De mi época escolar recuerdo un segundo test: consiste en plantear una tarea de hecho irrealizable. En la escuela nos describían el caso de un muchacho que debía copiar un texto en la oficina; para que cumpliera su finalidad, el texto debía entregarse deprisa y con muy buena letra. Sin embargo, la tarea estaba planteada de tal manera que si el texto se copiaba con esmero no se llegaba a terminarlo, y si se escribía con la rapidez necesaria no quedaba más remedio que descuidar la letra. Se trata de una situación conflictiva típica, de aquellas que precisamente intentamos eludir. En el test, la situación conflictiva se construye a propósito con objeto de obligar a la persona que debe resolverla a hacer uso de la ruptura de simetría que lleva dentro de sí. El psicólogo espera que la decisión tomada por el examinando le aporte informaciones acerca de su carácter: ¿es esmerado o descuidado? Desde luego, todo el test se convierte en una farsa si la persona en cuestión conoce de antemano las intenciones del psicólogo y logra burlarlas.

Tests de este tipo se emplean en todas partes; también, naturalmente, en el ejército norteamericano. Desde hace algún tiempo, entre los físicos circula la siguiente anécdota: un destacado colega fue llamado a filas y tuvo que someterse a un test psicológico. Para comprobar la sinceridad de su carácter, el psicólogo le pidió que le mostrara las manos. Si el soldado en ciernes le mostraba las palmas el psicólogo concluiría que se trataba de una personalidad abierta y franca. Si en cambio le presentaba los dorsos creería haber descubierto el carácter reservado del sujeto en cuestión: ¿Qué hizo nuestro físico ante el requerimiento del psicólogo? Le mostró el dorso de una mano y la palma de la otra, con lo cual el psicólogo ya sufrió un pequeño shock y exclamó:

—¡Por Dios, deles la vuelta!

El físico así lo hizo, de modo que el psicólogo, por supuesto, vio nuevamente un dorso y una palma. El hecho es que nuestro colega fue dispensado del servicio militar. Tal vez sea ahora el propio psicólogo quien esté en tratamiento.

La vida está llena de conflictos

Hasta aquí en realidad nos hemos limitado a hablar de conflictos artificialmente provocados; la vida misma, sin embargo, está llena de conflictos

análogos. Veamos algunos ejemplos. Un joven quiere estudiar en la universidad y duda entre dos disciplinas totalmente distintas. Ambas le ofrecerían ciertas ventajas, pero también le acarrearían problemas.

Otro ejemplo se refiere a una joven. La casualidad quiere que en un breve espacio de tiempo conozca a dos hombres muy simpáticos que quieren casarse con ella. Se siente atraída por ambos y no logra decidirse a rechazar a ninguno de los dos. Es incapaz de resolver la situación hasta que una sola frase de uno de los pretendientes hace inclinar la balanza a su favor y la joven se decide definitivamente por él. En términos sinergéticos, la decisión ha sido producto de una «fluctuación» (una sola frase).

De todas maneras, en la esfera de lo psicológico suele ser más frecuente la siguiente situación: un viudo soporta su soledad a duras penas y desea volver a casarse. Su búsqueda es intensa y al cabo de poco tiempo llega a conocer a dos señoras que estarían dispuestas a casarse con él. Pero ahora comienza a reflexionar: ¿cuál de ellas le conviene? A través de numerosas discusiones con sus amigos y conocidos va sopesando las ventajas y desventajas de cada una de las damas. Pero mientras va analizándolas, su conflicto se ahonda cada vez más. Comprueba que es incapaz de tomar una decisión. Los aspectos positivos y los negativos, que naturalmente también influyen en su afecto, están igualados. Nos hallamos ante una típica situación de conflicto psicológico. A causa del conflicto el viudo retrasa tanto su decisión que las damas finalmente se cansan y se apartan de él.

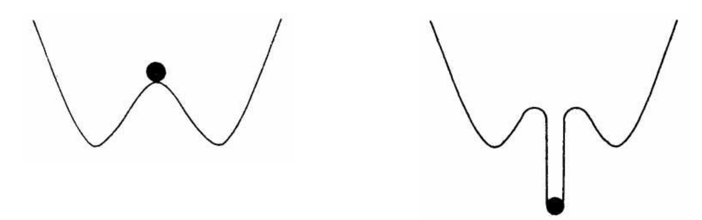


Fig. 10.5: ilustración de las consecuencias de un tiempo de reflexión excesivo. La esfera va cavándose una fosa de la que ya no podrá salir.

El proceso psicológico correspondiente puede ilustrarse claramente con nuestro modelo mecánico de la esfera colocada en un recipiente (fig. 10.5). En este caso suponemos que la esfera es de acero y el recipiente de un material blando. Mientras la esfera permanezca «indecisa» en el centro, se irá

cavando literalmente su propia fosa en el material blando, hasta ser incapaz de abandonarla y liberarse por sí misma. En el caso psicológico comentado por supuesto también cabe la posibilidad de que el viudo indeciso en el fondo no quisiera casarse y sólo pretextara el conflicto para llegar igual que la esfera, a una situación irreversible.

En los tiempos en que se ve amenazada la propia supervivencia, las indecisiones pueden tener consecuencias fatales. Bruno Bettelheim en su obra *Erziehung zum Ueberleben* («Educación para la supervivencia»] (Stuttgart, 1980. DVA) ofrece ejemplos de personas perseguidas que vacilan constantemente entre esconderse o emprender una arriesgada huida del régimen que las acosa.

Las características de estos ejemplos se pueden aplicar a numerosas situaciones conflictivas. Al principio, dos soluciones nos parecen equivalentes. Luego intentaremos optar por una de ellas apelando a criterios de decisión jerárquicamente superiores. Estos criterios están destinados (sinergéticamente hablando) a romper la simetría. Lo cual nos lleva a una conclusión fundamental deriva de la escena de la sinergética: en una serie de casos simplemente no existen criterios jerárquicamente superiores que permitan tomar una decisión. Por más que reflexionemos nos resultará imposible eliminar definitivamente el conflicto. A lo cual se suma el hecho de que la vida suele brindarnos plazos extremadamente cortos para tomar decisiones. Es obligado concluir que ciertos problemas pueden tener, en principio, dos (o más) soluciones equivalentes. Muchas veces nos resultará imposible decidir si esas soluciones tienen real e inequívocamente el mismo valor. Después de algún tiempo de reflexión para sopesar los distintos puntos de vista, deberemos reconocer que estamos en presencia de un auténtico conflicto y que las dos (o más) soluciones tienen realmente los mismos méritos. Pero si es así, la opción resulta indiferente. De lo cual se desprende otra consecuencia: no debemos lamentar la elección a posteriori. Convendrá que recordemos que después de todas nuestras reflexiones escogimos una entre varias soluciones totalmente equivalentes y que las otras también habrían tenido sus aciertos.

Transferencia de los conflictos en el ámbito social

Precisamente en el ámbito social se producen conflictos con dos soluciones o, mejor dicho, salidas equivalentes, pero que se resuelven gracias a la acción *conjunta* de los hombres. Lo cierto es que, en estos casos el conflicto en cuestión en realidad no se resuelve, sino que meramente se desplaza. Comencemos citando unos ejemplos relativamente anodinos, pero cuya analogía con cuestiones de palpitante actualidad es inmediata. Un recién nacido necesita, ciertamente, un apellido. En muchos pueblos la costumbre, e incluso la ley, determinan que reciba el apellido del padre. Pero, naturalmente, también podría recibir el de la madre. Sin una regulación legal se crearía una situación conflictiva para toda pareja de padres: «¿Cuál de nuestros apellidos ha de recibir el niño?» No cabe duda de que la situación sería conflictiva en todos los casos; sin una disposición legal, los padres tendrían que ponerse de acuerdo para resolverla.

Lo mismo vale para el casamiento. ¿Han de usar los cónyuges el apellido del hombre o el de la mujer? Hay parejas que optan por el apellido compuesto: Müller-Meier. Es fácil calcular que en caso de implantarse esa costumbre, al cabo de diez generaciones los apellidos estarían formados por miles de apellidos simples: un absurdo que prueba la necesidad de este compromiso.[1]

Por lo tanto, de hecho sólo quedan las posibilidades de optar por el apellido del esposo (padre) *o* por el de la esposa (madre). Evidentemente las sociedades anteriores se percataron del problema y quebraron la simetría a través del comportamiento de la comunidad. Esta ruptura de la simetría puede producirse por tradición o a través de una ley. La ley desempeña entonces el papel de ordenador, esclavizando a los cónyuges en la elección del apellido de sus hijos. Por otra parte, al menos en las democracias, las leyes son promulgadas por los representantes del pueblo: el ordenador está determinado por los individuos. Encontramos una vez más la interrelación entre el ordenador y los individuos característica de la sinergética.

[1] Las costumbres españolas no invalidan el razonamiento; sólo lo «retrasan» en una generación. El nieto recibe sólo los apellidos de sus abuelos paterno y materno (¡y siempre en ese orden!), y se opta por eliminar los de sus abuelas. Sólo lleva los «apellidos de casadas» de sus abuelas, aunque éstas no los usen. *(N. del T.)*

La otra posibilidad consiste en que no surja ordenador alguno. En el caso que estamos tratando eso significaría que la ley deja sin resolver el problema de los apellidos y traslada el problema al seno de cada familia. De lo cual se desprende inevitablemente el siguiente corolario: una mayor libertad individual implica más posibilidades de conflictos individuales.

Otro conflicto de este tipo es el de la patria potestad. ¿Privilegia la legislación al padre o a la madre en lo tocante a la crianza de los hijos? Este problema se plantea sobre todo en caso de divorcio. Por lo general, el juez confía a los niños pequeños a la madre. Una vez más, la colectividad se encarga de romper la simetría. En principio, los niños también podrían vivir con el padre. En estos procesos de separación o divorcio el juez debe romper la simetría. Pero si se careciera de las leyes necesarias, la ruptura voluntaria de la simetría sólo se transferiría a otra instancia.

Otro ejemplo puede seguir aclarando esta problemática: la cuestión de si para una pareja es más ventajoso casarse o vivir en una unión libre cuasi-matrimonial. Una vez más chocan aquí las ventajas y desventajas de una y otra solución, al igual que en todas las situaciones conflictivas típicas. Entre los muchos pares contrapuestos podemos citar las ataduras, que al mismo tiempo conllevan la posibilidad del pago de alimentos por parte del cónyuge. En la unión no matrimonial la libertad lleva aparejada la automática inexistencia del deber asistencial en caso de ruptura del vínculo. Debe quedar perfectamente claro que es imposible obtener simultáneamente ambas ventajas. En el caso de la disolución de una unión no matrimonial a veces surgen fuertes disensiones económicas; por ejemplo, cuando hay una vivienda común adquirida en propiedad. De nuevo la solución del conflicto se deja en manos del Estado. Pero el colectivo, el propio Estado, no suele tener previstas tales regulaciones, puesto que cuenta precisamente con la institución del matrimonio.

Todos estos ejemplos, que podrían multiplicarse por docenas, ilustran que en un Estado existe una continua transferencia de los conflictos del individuo a la colectividad o viceversa. Esta interrelación entre el individuo y la colectividad tiene como resultado que la segunda libera al primero, a través de productos colectivos como lo son las leyes, de decisiones personales que podrían acarrearle conflictos. Recíprocamente, una mayor libertad de decisión significa para el individuo una mayor posibilidad de que surjan conflictos.

Los productos colectivos de los que hablábamos no están relacionados exclusivamente con el derecho matrimonial. También pueden afectar a comunidades o ciudades enteras, y hay casos en que la existencia de disposiciones legales no modificaría en absoluto la situación. Los describiremos a continuación.

Después de vivir algún tiempo en distintas ciudades podemos comprobar la existencia de determinados «climas» en el trato mutuo entre sus habitantes. Hay ciudades en las que las personas son muy afables, y otras, cuyos habitantes se muestran gruñones, tanto entre sí como ante los forasteros. A todas luces, la elección de una actitud personal «simpática» o «antipática» constituye aquí una ruptura de la simetría llevada a cabo por el colectivo. Una vez cristalizada una actitud general, un recién llegado ya no podrá luchar contra ella, y con el correr del tiempo su conducta será frecuentemente muy similar a la de los demás. Si se muestra jovial en una ciudad rezongona, se frustrará y probablemente termine por volverse también rezongón. Si un gruñón llega en cambio a una ciudad afable, hay grandes posibilidades de que se contagie de la simpatía general. El mismo fenómeno se puede observar —y esto suele ser más angustioso— en las oficinas públicas y privadas, en las que también existen climas locales muy diferentes, contra los cuales poco puede hacer un recién llegado.

XI. EL CAOS, EL AZAR Y LA COSMOVISIÓN MECANICISTA

¿Predeterminación o azar?

No creo que haya filósofos ni, mucho menos, científicos que nieguen la profunda influencia de los conocimientos de la física y las ciencias naturales en general en la formación de nuestra visión del mundo. Todo nuestro pensamiento ha acusado la influencia de las revoluciones científicas que conmovieron la física en sus cimientos. Sólo a través de las leyes de la física y su comprobación millones de veces repetida se forjó nuestra convicción de que los fenómenos naturales obedecen a férreas leyes.

En el siglo pasado, el florecimiento de la mecánica realizó una aportación sustancial en ese sentido. La mecánica estudia los movimientos de los cuerpos en función de las fuerzas que actúan entre ellos. El descubrimiento fundamental de Newton fue precisamente la conclusión de que la caída de una manzana se rige por las mismas leyes que el movimiento de la Tierra y los demás planetas alrededor del Sol. Las leyes de Newton constituyen el fundamento de la técnica de construcción de cohetes, por ejemplo, es decir, de la conquista del espacio. Actualmente podemos ver en la televisión que los cohetes enviados a la Luna siguen trayectorias exacta y previamente calculadas. Simultáneamente, este respeto de una trayectoria precalculada y por ende prescrita tiene para nosotros algo inquietante, e incluso angustioso. Pues si la sucesión de los más diversos acontecimientos está fijada a priori, no somos más que partes de un inmenso engranaje al que nos hallamos sometidos, querámoslo o no. Si todo está predeterminado ni siquiera se le deja una oportunidad al azar. Las profundas consecuencias filosóficas y religiosas de una cosmovisión determinista ya han sido objeto de frecuentes debates, además de que cada cual se las puede imaginar fácilmente. Por eso causó gran sorpresa el cambio introducido por la teoría cuántica en los años veinte: con ella renació el azar. Recordemos al respecto los fenómenos que tienen lugar en una lámpara y en el láser. Si estimulamos un electrón de un átomo, es decir, si el electrón recibe más energía de la que tiene habitualmente, tenderá a despojarse de esa energía, a emitirla en forma de onda luminosa. Según demuestra la teoría cuántica, es imposible predecir en qué momento exacto irradiará el electrón su energía. Sucede igual que

con los dados: no podemos predecir cuántos puntos obtendremos en una jugada individual.

Por lo que actualmente sabemos acerca de los fenómenos del microcosmos, es decir, acerca del para nosotros invisible reino de los átomos, sus fenómenos están regidos por el azar. Todos los intentos de restablecer aquí la cosmovisión mecanicista han fracasado y contradicen los datos empíricos. El azar, lo imprevisible, está en flagrante contradicción con la concepción de un curso de los acontecimientos determinado de una vez y para siempre.

¡Predeterminación y azar a la vez!

Para muchos científicos constituyó una sorpresa el hecho de que en los últimos años se comprobara una y otra vez que en múltiples ámbitos de la naturaleza hay acontecimientos que ocupan una suerte de posición intermedia. Ciertos fenómenos de movimiento, por ejemplo, responden a leyes tan férreas como las de la mecánica, o incluso las ejemplifican. Pero simultáneamente tienen algo de casual, de imprevisible. Este grupo de acontecimientos tan novedoso, que sólo ahora comienza a abrirse paso en la conciencia de los científicos en general, se denomina «caos».

La palabra «caos» es habitual en el lenguaje corriente. Pensemos tan sólo en el caos circulatorio: se trata de una embrolladísima aglomeración de vehículos, de una confusión desesperante. Esta imagen de la congestión del tráfico ya pone de relieve los rasgos característicos del concepto de caos tal como se emplea en sentido científico. Todos los vehículos han llegado a sus puestos en virtud de rigurosas leyes de la mecánica. No obstante, el caos circulatorio (y el caos en general) se le aparece al observador como algo completamente confuso, donde las posiciones de los vehículos parecen distribuidas al azar. Un camión al lado de un coche azul, un coche rojo en posición transversal, detrás, una motocicleta, etc. La única diferencia respecto del caos en los fenómenos naturales consiste en que en estos últimos todos los «vehículos» además están en movimiento y cambian continuamente sus entreveradas posiciones. El caos, antes considerado un caprichoso caso particular, se revela actualmente corno modelo típico del comportamiento de muchos de los sistemas estudiados por la sinergética. Observemos al respecto algunos ejemplos ya mencionados con anterioridad.

En el movimiento de los líquidos se forman dibujos muy diversos, según la intensidad con que calentemos una capa horizontal de un líquido, por ejemplo. Después de unas pocas etapas en las que los dibujos que se forman son regulares —«rollos», paneles de abejas, etcétera—, el líquido inicia un movimiento totalmente irregular. Se vuelve turbulento. Ahora podemos suponer fundadamente que ese movimiento confuso y completamente irregular está sometido a las leyes de los movimientos caóticos. Algo similar se observa cuando fumamos un cigarrillo y echamos bocanadas de humo en forma de anillos. Estos van deformándose, y finalmente el humo comienzo a moverse de manera caótica. El movimiento se ha vuelto turbulento. Como ya hemos visto, en determinadas reacciones químicas se forman dibujos macroscópicos, ya sea en el espacio, o en el tiempo, como el viraje periódico del azul al rojo y viceversa en la reacción de Belousov-Shabotinsky.

Los químicos ya habían observado antes unos intervalos totalmente irregulares en el viraje del rojo al azul. Suponían que no habían preparado bien la mezcla y se abstenían de publicar sus observaciones. Ahora que se ha reconocido la validez general del fenómeno «caos» los químicos rivalizan en encontrar y publicar siempre nuevos resultados sobre sucesiones temporales irregulares y también dibujos espaciales de tales procesos. Incluso se han hecho predicciones sobre la eventual turbulencia de la luz láser. Se trataría de trenes de ondas irradiados de forma completamente irregular, pero cuyo carácter sería, de todas maneras, distinto del de la luz de las lámparas comunes. Un novísimo tipo de luz está aguardando la hora de su descubrimiento.

La idea del caos también está haciendo su entrada en la biología y permite aclarar súbitamente ciertos fenómenos completamente incomprensibles en el pasado. Por ejemplo, hay poblaciones de insectos que fluctúan muy irregularmente de año en año. Actualmente ya se dispone de modelos matemáticos que permiten expresar las fluctuaciones.

En todos estos fenómenos, que a muchos les parecen del todo novedosos, los científicos reconocen las palabras del *Eclesiastés:* «nada nuevo hay bajo el sol». En efecto ya a comienzos de siglo el matemático francés Jules Henri Poincaré (1854-1912) descubrió la posibilidad de un movimiento caótico en problemas ciertamente muy distintos de los que acabamos de mencionar: nada menos que en la mecánica celeste. Si se estudia el modelo

de un sistema solar con dos soles pero con un solo planeta se verá que este planeta puede ejecutar los movimientos más increíbles y complejos, como una pelota de fútbol empujada al azar con el pie. He aquí el dilema de la ciencia: el movimiento del planeta parece totalmente aleatorio, pese a que responde a las estrictas leyes de la mecánica.

El ejemplo del planeta en un sistema bisolar nos muestra que incluso un sistema mecánico muy simple es capaz de ejecutar movimientos sumamente complejos. Mientras que antes nos parecía natural, conforme a la mecánica de Newton, que los planetas de nuestro sistema solar girasen alrededor del sol recorriendo órbitas elípticas eternas e inmutables, a la luz de los últimos descubrimientos de la mecánica esta estabilidad de las órbitas planetarias resulta un enigma. En el siglo pasado, el rey de Suecia formuló la siguiente pregunta en un concurso en el cual participaron los sabios más ilustres del momento: «¿Es estable nuestro sistema solar, o existe, por ejemplo, la posibilidad de que algunos planetas se precipiten finalmente sobre el Sol y otros se vean lanzados fuera del sistema solar?» Todos esos fenómenos serían compatibles con el principio de la conservación de la energía y el principio del impulso.

La respuesta que dan actualmente los matemáticos a esta cuestión va ligada a precisiones tan sutiles, en cuanto a los períodos de rotación de los planetas, que a veces resulta difícil creer que se trate de la respuesta definitiva. Así y todo, si fuera cierta esta teoría, permitiría explicar la estructura de los anillos de Saturno (fig. 11.1). Estos anillos, que creemos formados por trocitos de hielo, presentaban hasta ahora una estructura de aros concéntricos en los telescopios. El interrogante era por qué había espacios vacíos entre los anillos. ¿Por qué no podía haber trozos de hielo en aquellos espacios? La respuesta de los matemáticos que se ocupan del movimiento de los cuerpos celestes es la siguiente: debido a la influencia de las lunas de Saturno, los trocitos de hielo se ven forzados a recorrer órbitas caóticas en aquellas zonas y, por ende, a abandonarlas. Pero quién sabe si esta teoría es la definitiva. Las vistas de proximidad tomadas por las sondas espaciales norteamericanas nos muestran que en realidad las estructuras son mucho más sutiles. Los anillos de Saturno se nos presentan con surcos como los de un disco de larga duración, y en los espacios que hasta ahora se creían vacíos parece haber algo así como los radios de una rueda. Se trata, pues, de enigmas pendientes de solución.

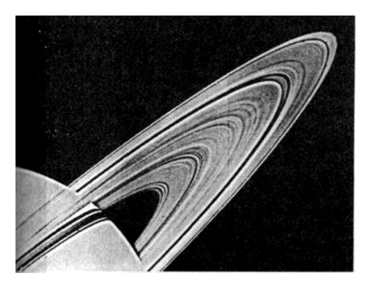


Fig. 11.1: los anillos de Saturno.

Una explicación rigurosa de la génesis de los movimientos caóticos sólo es posible en el marco de las matemáticas, y éstas apenas han comenzado a comprender el «caos».

En cualquier caso no es difícil mostrar por qué el azar puede introducirse subrepticiamente en movimientos prefijados.

Máquinas tragaperras: el caos planificado

Imaginémonos un canto vivo, una hoja de afeitar colocada en posición vertical, sobre la que dejamos caer bolitas de acero (fig. 11.2). El hecho de que una bolita caiga a uno u otro lado de la hoja de afeitar dependerá de una mínima fracción de milímetro en el momento de su choque contra el filo. Si el choque se produce un poco a la derecha del centro la bolita se desviará hacia la izquierda y viceversa. Todo el proceso está ostensiblemente predeterminado, y sin embargo tiene algo de casual. Ello se debe a la imposibilidad de determinar o medir con total precisión la posición inicial de la bolita, y a que una desviación mínima origina al final un recorrido completamente distinto. Lo mismo ocurre con los dados. Por lo común, el dado cae con uno de sus cantos sobre el tablero de la mesa; su recorrido ulterior depende tan sensiblemente de las condiciones previas como el camino de las bolitas que caen sobre la hoja de afeitar.

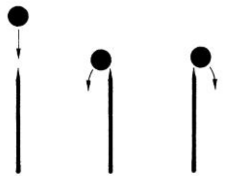


Fig. 11.2: un bolín de acero cae sobre una hoja de afeitar.

Como vemos, la diferencia entre acontecimientos regidos por el azar y acontecimientos predeterminados comienza a difuminarse, a pesar de que ambos casos-límite pueden definirse estrictamente desde un punto de vista filosófico, y que «en realidad» deberían existir sólo estos dos casos. Lo decisivo es el hecho de que ínfimas inexactitudes en la posición inicial se traducen en diferencias macroscópicas en el curso ulterior de los acontecimientos.

A veces, los aficionados y los inventores prácticos son más sagaces que los científicos más encumbrados. Desde hace tiempo toda una industria de productores de máquinas tragaperras vive del principio de que los movimientos mecánicos estrictamente determinados pueden imitar con un parecido asombroso al azar. Esas máquinas hacen caer, por ejemplo, bolitas sobre cantos. El recorrido de la bolita en cada paso es imprevisible para el jugador, y el resultado, por consiguiente, una cuestión de suerte. La figura 11.3 nos muestra el esquema de una de estas conocidas máquinas.

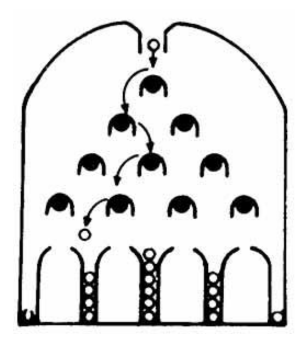


Fig. 11.3: ejemplo de una máquina tragaperras. ¿A dónde llegará el bolín?

El norte no siempre fue el norte

En las novelas de ciencia ficción suele narrarse el destino de personas trasladadas al pasado o al futuro. Supongamos que un autor de ciencia ficción introduzca a un hombre provisto de lo necesario para la supervivencia en una máquina del tiempo y lo sitúe en el año cien mil antes de nuestra

era. Ahora será preciso que se oriente mediante una brújula. Como nuestro personaje tiene frío, quiere marchar hacia el sur; la brújula le señala el camino. Sin embargo, a medida que avanza siente cada vez más frío. Finalmente se da cuenta de que en realidad está caminando hacia el norte. Su brújula le señala la dirección equivocada. Dado que toda brújula indica en qué dirección se halla el campo magnético de la Tierra, debemos concluir que éste ha cambiado de sentido.

No podemos enviar a nadie al pasado. Pero la naturaleza lo hace por nosotros, aunque de otra manera. En Groenlandia se encontraron formaciones geológicas magnéticas. En los distintos estratos, los pequeños imanes de las rocas fueron alineados por el correspondiente campo magnético de la Tierra y luego «congelados», es decir, permanecieron inmóviles en la alineación alcanzada. Por otra parte, la estratificación permite leer la edad de cada estrato. En cada estrato la imantación tiene una dirección diferente, por lo cual los geólogos pueden deducir que la dirección del campo magnético terrestre fue cambiando de tiempo en tiempo en el curso de millones de años, pero en períodos que parecen totalmente irregulares. El campo magnético de la Tierra debe de haber cambiado su polaridad de manera caótica, lo cual se ve confirmado por las teorías más recientes.

El caos en la sinergética: ¿una contradicción?

Después de leer el apartado anterior, algún que otro lector se preguntará qué tienen que ver estos procesos caóticos con la sinergética. Esta ciencia es la doctrina de la acción de conjunto: de la acción conjunta de un sistema formado por muchas partes. En cambio, en el movimiento de un planeta en un sistema bisolar intervienen únicamente tres cuerpos. Además, al comienzo de este libro parecía que la interacción de muchos sistemas individuales generaba *siempre* estructuras o fenómenos ordenados. En consecuencia, deberemos ocuparnos más detenidamente de estas dos cuestiones, tanto más cuanto que ello nos permitirá sacar conclusiones en otros campos; por ejemplo, en el de los procesos económicos. Pero para dilucidar estos puntos tendremos que introducir un lenguaje un poco más abstracto, de modo que los lectores menos interesados en estas cuestiones teóricas pueden dar por terminada aquí la lectura de este capítulo.

La conexión entre los procesos caóticos y la sinergética se aclara en cuanto recordamos el concepto de ordenador. Hemos visto, a través de una serie de ejemplos, que un sistema sinergético puede estar regido por más de un ordenador. En la formación de estructuras de panales en los líquidos, por ejemplo, cooperan tres ordenadores, que representábamos mediante ondas que encierran un triángulo equilátero. En otros casos, como en el de la evolución, hay varios ordenadores que *compiten* entre sí. Por tanto, las propiedades macroscópicas de los sistemas sinergéticos se describen frecuentemente en términos de cooperación, o también de competencia, entre ordenadores.

Cuando formulamos los problemas sinergéticos en términos matemáticos aparecen siempre las mismas ecuaciones para los ordenadores, aun cuando los sistemas en sí sean de naturaleza totalmente diferente. Y he aquí que ciertas ecuaciones que describen los ordenadores pueden implicar precisamente procesos caóticos. Recurramos una vez más al ejemplo del líquido calentado desde abajo: en la fase del movimiento caótico, tres ordenadores se interrelacionan de tal manera que hacen fluctuar violentamente el sistema entre sus distintos estados de movimiento. En un estudio más minucioso, realizado por nosotros, esa relación entre los ordenadores se representa de la siguiente manera: durante algún tiempo domina uno de ellos y esclaviza a los otros dos, cuyo movimiento viene prescrito, por tanto, por el primer ordenador. Pero poco después, éste deja de dominar y prevalece otro, con lo cual el juego se repite. Es interesante observar que el «cambio de dominación» ocurre de forma totalmente irregular, es decir, caótica.

A este grupo de ecuaciones pertenece también la del movimiento de los cuerpos celestes, en el cual las coordenadas de los gravicentros actúan precisamente como ordenadores.

Actualmente sabemos que se puede esperar un movimiento caótico en muchos casos de interrelaciones entre ordenadores; por consiguiente, debemos contar con situaciones caóticas incluso donde hasta ahora creíamos que se trataba de errores de medición y/o las rechazábamos indignados en virtud de consideraciones teóricas. Ejemplos de ello son ciertos fenómenos económicos y también el efecto de intervenciones administrativas en procesos de naturaleza en gran medida autoorganizada, como por ejemplo la

división y el desarrollo de la investigación y la enseñanza en las universidades.

¿Podemos pronosticar el tiempo o estamos sujetos a los caprichos de san Pedro?

Algunos sábados por la noche la televisión nos anuncia un domingo hermoso y soleado. Alborozados preparamos nuestra excursión dominical. Al día siguiente, gran decepción: llueve a cántaros.

No sólo los meteorólogos, sino también los físicos y matemáticos se preocupan desde hace tiempo por aumentar la fiabilidad de los pronósticos meteorológicos. Un húngaro radicado en Estados Unidos, John von Neumann, un genio matemático de renombre universal, descubrió los principios fundamentales de las modernas calculadoras electrónicas, la primera de las cuales se construyó en Estados Unidos en los años cuarenta con la participación decisiva del gran matemático. Naturalmente, Neumann comprendió enseguida que la computadora ofrecía unas posibilidades técnicas enormes, entre las que se destacaba su capacidad de procesar un sinnúmero de datos de medición. En consecuencia, Neumann sugirió establecer una densa red de observaciones meteorológicas en todo el planeta; las estaciones meteorológicas debían recoger datos de la presión atmosférica, la temperatura, la velocidad de los vientos, la humedad, etc., y transmitirlos a una computadora central. Dado que el comportamiento del aire es similar al de los líquidos, ello debería permitir pronosticar exactamente el movimiento de las masas de aire, su porcentaje de humedad y, así, sobre la base de las ecuaciones fundamentales del movimiento de los líquidos, el tiempo meteorológico. Ya hemos hablado antes de las similitudes entre los movimientos del aire y los de los líquidos, cuando mencionamos la analogía entre los «rollos» de los líquidos y las «calles» de nubes. Pero a pesar de que la red de puntos de observación es cada vez más densa, los pronósticos apenas han mejorado.

En la década de los sesenta, el meteorólogo E. N. Lorenz (EE.UU.) observó las ecuaciones fundamentales de los líquidos con mayor detenimiento. A través de cálculos computarizados descubrió que estas ecuaciones también predicen formas de movimientos que, como diríamos ahora, se desarrollan de manera completamente caótica. Pero, ¿qué era el caos?

Recordemos una vez más su quintaesencia: un proceso se desarrolla de modo caótico cada vez que el movimiento sigue un curso completamente diverso en cuanto se modifican muy ligeramente los valores iniciales (por ejemplo, las velocidades iniciales de las masas de aire). Pero como naturalmente jamás podemos medir los movimientos del aire con una precisión del cien por ciento, los errores, por pequeños que sean, pueden traducirse, en pronósticos totalmente errados en el curso de unos días o incluso de unas pocas horas.

Todo parece indicar que san Pedro se ha reservado así un triunfo para sorprendernos con sus caprichos.

¿Se pueden domesticar los plasmas? El caos en la fusión nuclear

Los antiguos griegos hablaban de cuatro estados físicos: tierra, agua, aire y fuego. Tres de estos estados los conocemos muy bien. En la terminología actual se denominan sólido, líquido y gaseoso. Sin embargo, los físicos descubrieron efectivamente un cuarto estado: el del plasma.

En el dominio microscópico, los estados físicos se distinguen únicamente por el ordenamiento de las moléculas. En el estado gaseoso las moléculas vuelan libremente entre sí y sólo chocan de vez en cuando. A medida que vamos calentando un gas, las moléculas adquieren un movimiento cada vez más intenso y se desgarran en sus componentes originales, los átomos. Como es sabido, un átomo está formado por un núcleo, que tiene una carga eléctrica positiva, y por una serie de electrones, de carga eléctrica negativa que giran alrededor de aquél. A temperaturas muy elevadas —de varios millones de grados— los propios electrones adquieren un movimiento tan violento que se separan de su núcleo atómico, el cual mantiene su carga eléctrica positiva. Los físicos llaman «plasma» a un gas en el cual los electrones se han alejado de sus núcleos. En la naturaleza ese estado no es nada nuevo. Nuestro Sol, por ejemplo, es un plasma, a causa de las temperaturas allí reinantes, que en el interior alcanzan unos cien millones de grados. A temperaturas tan altas los distintos núcleos chocan unos contra otros con portentosa violencia, con lo cual incluso pueden formarse nuevos núcleos atómicos a partir de dos núcleos más pequeños.

Ya en los años treinta, Hans Albrecht Bethe y Carl-Friedrich von Weizsäcker elaboraron un esquema según el cual los núcleos atómicos

reaccionan entre sí, con lo cual, en resumidas cuentas, de cuatro núcleos de hidrógeno se forma uno nuevo: el del átomo de helio. En química, la formación de moléculas por combinación de átomos libera energía, la cual aparece luego como movimiento térmico. Análogamente, al producirse una fusión de núcleos atómicos se libera energía; pero en este caso, la cantidad de energía liberada es enorme. Estos procesos crean la energía que el Sol lanza al espacio; casi diríamos que la derrocha, pues sólo una mínima parte de esa energía llega a tocar la Tierra. De todos modos, esa fracción basta para suministrar la energía necesaria para todos los fenómenos vitales a los que constantemente hace referencia este libro.

Dado que las fuentes terrestres de energía, como el petróleo, el carbón e incluso la energía nuclear disponible, van agotándose a un ritmo lamentablemente muy previsible, tenemos que buscar nuevas fuentes energéticas. Sería muy natural intentar reproducir en un laboratorio los fenómenos que tienen lugar en el Sol y construir así un minisol suministrador de energía en la Tierra. Para ello se podría pensar en generar plasmas y obtener de esta manera la fusión nuclear.

Ni siquiera es muy difícil obtener un plasma. En los arcos voltaicos que podemos observar en las soldaduras la intensa corriente entre los electrodos genera un plasma en el aire. Mediante una serie de artificios también es posible producir temperaturas muy elevadas. Pero lamentablemente, la concreción de la fusión nuclear tiene una pega. Aun cuando las temperaturas sean muy elevadas, los núcleos atómicos se encuentran rara vez. Tienen que recorrer muchos kilómetros antes de dar con otro núcleo con el que puedan fusionarse. Por tanto, el plasma debería tener unas dimensiones enormes, de docenas de kilómetros, para que la fusión pueda tener lugar. Además, las partículas de un plasma se dispersan, por supuesto, muy rápidamente. Tampoco podemos encerrar un plasma en un recipiente. Dadas las enormes velocidades de sus componentes, los electrones y núcleos atómicos, a tan altas temperaturas, éstos atravesarían instantáneamente las paredes del recipiente. Con todo, a los físicos se les ocurrió una manera de impedir la dispersión de las partículas y de lograr al mismo tiempo que entrechoquen repetidas veces. En efecto, si se instalan gigantescos imanes alrededor del plasma, el campo magnético (como todo físico sabe) desvía constantemente las partículas y las obliga a recorrer una nueva trayectoria circular. De esta manera se las mantiene dentro de un espacio relativamente

reducido (que, de todos modos, puede tener un diámetro de varios metros) y se les brinda la posibilidad de buscar nuevas «parejas». La máquina más prometedora se llama Tokamak (fig. 11.4). Este nombre proviene del ruso; *toka* significa *corriente,* y *mak* es la forma abreviada de *máxima.* Es, pues, una máquina destinada a generar una corriente máxima de partículas de plasma.

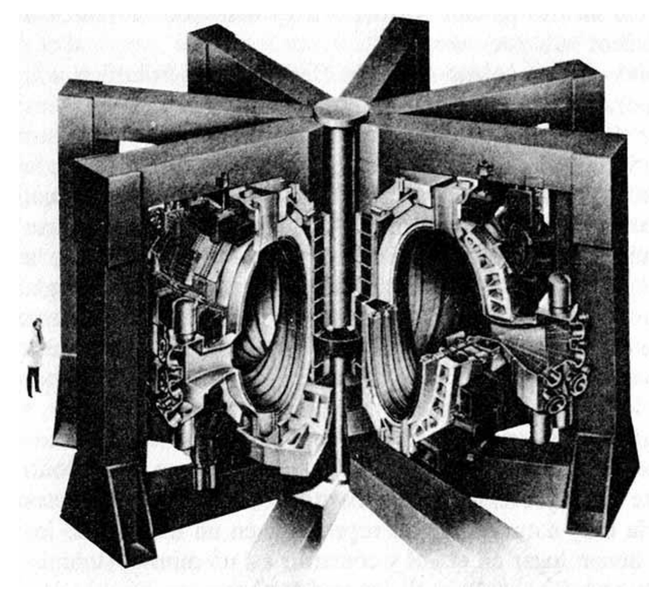


Fig. 11.4: la gigantesca máquina Tokamak (compárese su tamaño con el del hombre a su izquierda).

Y ahora llegamos al punto crucial: los plasmas son un Eldorado para las investigaciones que busquen inestabilidad. En muchos apartados de este libro hemos visto que en las inestabilidades se modifica el movimiento macroscópico. Los físicos del plasma han encontrado ya más de cien tipos distintos de inestabilidades: unas, en las que súbitamente se propagan ondas en el plasma; otras, en las que se forman dibujos de flujo completamente nuevos. Nosotros mismos hemos calculado uno de estos dibujos. Como es muy bonito, reproducimos y explicamos el resultado del cálculo en la figura

11.5. En otro caso de inestabilidad, la corriente plasmática se agota por completo al poco tiempo.

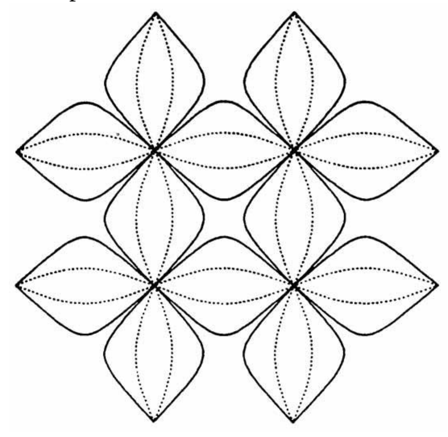


Fig. 11.5: el dibujo de flujo en un plasma calentado por su parte inferior en un campo magnético vertical. Las líneas son las curvas de nivel del campo de velocidades.

Las nuevas ondas, los nuevos dibujos de flujo, etc., presentan tal diversidad que los físicos del plasma a veces intentan relacionarlos con fenómenos vitales. Sin embargo, los físicos empeñados en obtener la fusión nuclear no están nada entusiasmados con la mayor parte de las inestabilidades, pues si un proceso salta constantemente de inestabilidad en inestabilidad, o si las fluctuaciones se intensifican cada vez más, el plasma ya no se deja conducir regularmente en círculo, por ejemplo. Se manifiesta entonces un fenómeno que sólo ahora está abriéndose paso en el acervo teórico de la física del plasma: el caos.

Numerosos ejemplos de los capítulos anteriores nos indicaban ya que pueden surgir movimientos totalmente irregulares. Según parece, tales movimientos pueden esperarse también en los plasmas. Por lo tanto, habrá que estudiar más a fondo la naturaleza de los movimientos caóticos para poder manejar técnicamente el caos. No dudo de que se logrará. Pero seguramente aún será necesario un considerable trabajo de investigación, en el cual las diversas disciplinas científicas podrán aprender mucho unas de otras desde

el punto de vista sinergético, puesto que el caos (en sentido científico) se refiere a unos fenómenos bien determinados.

XII. EFECTOS SINERGÉTICOS EN LA ECONOMÍA

En los capítulos anteriores nos ocupábamos de fenómenos de la esfera de las ciencias naturales, de fenómenos que incluso podemos describir matemáticamente. En este capítulo y el siguiente nos dedicaremos a cuestiones concernientes a las relaciones interhumanas. Desde el principio tenemos que preguntarnos si el hombre no es un ser tan complejo que todo intento de establecer una teoría predictiva está condenado a priori al fracaso. Sin embargo, en las teorías económicas no solemos ocuparnos de la conducta de un individuo *aislado*, sino de la de grupos enteros. La tesis sinergética que fundamentaremos y elucidaremos a continuación postula precisamente que para grupos enteros sí es posible realizar predicciones. El verdadero interrogante reside entonces en la posibilidad de describir, mediante leyes generales, el comportamiento de *grupos enteros* en el terreno económico o social.

La propia existencia de la sociología y de las ciencias económicas indica que efectivamente se intenta lograr una clarificación científica en estos campos. Dadas las dificultades inherentes a estos problemas, debemos contar de antemano con la existencia de orientaciones distintas para encararlos. Entre estas destacan particularmente dos: la que quiere comprender todo el acontecer a partir del comportamiento individual, en el que desempeña un papel determinante el factor psicológico, y la que trata los fenómenos económicos o sociales desde un punto de vista sistemático, para lo cual deberemos aclarar previamente qué significa el concepto de «sistema» en este contexto.

A fin de dilucidar la posición de la sinergética ante estas cuestiones, observemos primero unos ejemplos muy concretos de la esfera económica.

Toda la vida comercial se basa en el supuesto, generalmente tácito, de la existencia de normas. En efecto todo comerciante tiene que planificar, incluso a largo plazo, para lo cual le hace falta conocer el comportamiento de sus clientes. Tomemos un caso extremo: una tienda que vende ajuares para novias casi nunca sabe cuándo se casará una pareja *determinada*. No obstante, está en condiciones de predecir bastante bien la demanda, precisamente porque lo definitorio no es el comportamiento de una pareja aislada sino el de numerosas parejas. En ese caso, el comerciante se basa en

la experiencia de que anualmente se casa un cierto número medio de parejas. Por lo general, incluso podrá planificar la venta con bastante precisión porque conoce —por experiencia— las fluctuaciones estacionales.

Lo mismo sucede con un banco que debe contar con dinero en metálico para sus clientes. El banco tampoco sabe cuándo vendrá determinado cliente, ni cuánto dinero querrá sacar. Sin embargo, está en condiciones de disponer del dinero suficiente. En este caso, el arte consiste ciertamente en no tener demasiado dinero en caja, puesto que distraería fondos para inversiones a largo plazo.

Estos ejemplos ponen de relieve algo que sabemos por experiencia: que en el comportamiento de un número elevado de personas reaparecen las normas. Desde el punto de vista sinergético es importante distinguir entre comportamientos normales y anómalos. El comportamiento normal tiene lugar cuando las personas actúan de manera independiente entre sí, es decir, cuando no se ponen de acuerdo diciendo, por ejemplo, «la semana que viene todos compraremos el pan en la panadería X». La actuación independiente se rige por las leyes de los grandes números, establecidas en el siglo pasado por el genio matemático Cari Friedrich Gauss (1777-1855). No sólo se puede prever el número de artículos de que debe disponerse, sino también con qué fluctuaciones en la venta se debe contar.

Las circunstancias cambian por completo cuando se trata de una conducta colectiva, la cual es precisamente el objeto de las investigaciones sinergéticas. En lo sucesivo, cuando hablemos de un comportamiento colectivo, nos referiremos a una actuación en la cual las personas proceden como si se hubieran puesto de acuerdo. Por supuesto, eso no significa que cada persona deba hablar con todas las demás ni escucharlas aunque sólo sea indirectamente.

Aquí se dan situaciones similares a las que hemos visto en el láser, los líquidos y muchos otros ejemplos de los capítulos anteriores, en el sentido de que el individuo se ve obligado a actuar en la dirección de un nuevo estado de orden bien determinado. Como ejemplos muy drásticos tenemos las catástrofes financieras, con la venta masiva de acciones cuando la bolsa cae en picado (con lo cual los valores naturalmente caen aún más deprisa), la compra de oro en caso de inflación galopante, etc. Más adelante analizaremos otros casos menos dramáticos, pero quizá más importantes y carac-

terísticos. Si pensamos en los ejemplos de las ciencias naturales comprenderemos más fácilmente cuál es la cuestión esencial. Allí veíamos que al modificarse las condiciones exteriores, determinado estado de un sistema se volvía inestable y podía ser sustituido por otro, a menudo completamente distinto. Las diferentes partes del sistema (por ejemplo, un líquido) se veían arrastradas por el ordenador al nuevo estado; el ordenador las esclavizaba.

Gracias a la sinergética, actualmente se ha podido generalizar de un modo sorprendente la ley de los grandes números y estamos en condiciones de establecer normas incluso cuando los individuos actúan de manera colectiva, no independiente. La vida económica, que por cierto es sumamente compleja, nos ofrece un caudal inagotable de ejemplos en los que se manifiestan efectos sinergéticos. Hemos seleccionado algunos casos típicos, como por ejemplo el comportamiento de los comerciantes.

Dos vendedores de helados quieren ganarse a los veraneantes. ¿Cómo deben proceder?

Un ejemplo entretenido, que debo a uno de nuestros profesores invitados (Tim Poston), expone la situación de dos vendedores de helados en una playa. Ingenuamente se podría creer que lo mejor para ambos sería repartirse la playa en dos partes iguales y apostarse en el centro de la mitad que les corresponda. Pero esa situación no es necesariamente estable. A uno de ellos se le puede ocurrir aumentar sus ventas acercándose un poco a la línea divisoria imaginaria, con el fin de acaparar también a algunos de los clientes potenciales del otro vendedor. Entonces éste reaccionará y también se acercará un poco al centro. El juego se repite varias veces, hasta que ambos se encuentran en la mitad y compiten denodadamente. Cuando Poston me lo contó nos pareció que al final ambos saldrían perjudicados porque los veraneantes situados en los extremos de la playa ya no se les acercarían. En este caso se ve claramente que el comportamiento correlativo de los vendedores —cada uno de ellos va reaccionando ante lo que hace el otro— crea una situación en la que al final ambos ganan menos que si hubieran permanecido en su solitaria posición inicial. En economía abundan tales ejemplos; más adelante volveremos sobre ellos.

Sin embargo, después de mucho reflexionar me asaltaron las dudas: ¿es realmente forzoso que el comportamiento de los vendedores los lleve a reducir sus ganancias? Y recordé una observación realizada durante mis numerosos viajes de conferencias. Cuando buscaba determinada tienda o un restaurante en una ciudad extraña solía andar errando bastante tiempo hasta descubrir finalmente que en cierta barriada o calle había un restaurante al lado del otro o una tienda pegada a la siguiente. Eso se contradice con nuestra idea habitual de que para evitar la competencia las tiendas deberían establecerse según una distribución lo más homogénea posible. Así llegué a conjeturar que para los comerciantes son importantes las dimensiones del área en la que se instalan; en otras palabras, necesitan conocer la movilidad de los clientes, cuánto tiempo y cuántas ganas tienen de recorrer determinados trayectos. La distribución uniforme de las tiendas en una zona tiene sentido si los clientes sólo quieren desplazarse poco. Pero si están dispuestos a cubrir distancias mayores resultará más conveniente que los comercios se concentren en una zona determinada. Entonces volverán a ejercer cooperativamente una mayor atracción sobre los clientes. Estarán en condiciones de ofrecer en conjunto una gama más completa de artículos y de sobrepujar así a las tiendas aisladas. Por tanto, en esa zona se producirá una acumulación de tiendas cuya cercanía a primera vista nos parece perjudicial. Conozco algunos comerciantes que han trasladado su tienda relativamente pequeña a las inmediaciones de un gran centro comercial porque saben que con ello aumentará también la afluencia de clientes hacia su tienda. La concentración de comercios del mismo ramo en determinado distrito no debe de ser un fenómeno nuevo, según puede deducirse de los nombres de ciertas calles, como en el caso de la Bakerstreet de Londres.

¿Por qué crecen incesantemente las ciudades?

Acabamos de ver que los comercios suelen apiñarse en una zona determinada. En realidad, todos los asentamientos humanos se rigen por mecanismos similares. Ciertas instituciones sociales devienen necesarias y, además, posibles sólo a partir de determinadas dimensiones del asentamiento: escuelas, iglesias, hospitales, juzgados, teatros, administraciones, etc. También en este caso hay un condicionamiento recíproco entre las dimensiones del asentamiento y la creación de las nuevas instituciones. Con el aumento

de la comunicación entre las personas y las mayores aspiraciones en lo que se refiere a la vida cultural o a la interrelación económica, por ejemplo, se fortalece el deseo de que un asentamiento ya lo suficientemente grande se convierta en un lugar de residencia plena. Al mismo tiempo, tales asentamientos permiten la creación de nuevos puestos de trabajo; en países más pobres, pueden llegar a ser la única fuente de empleos.

Este debe de ser el motivo de que las grandes ciudades crezcan cada vez más y desplacen a los asentamientos más pequeños o, de hallarse próximos, los absorban. Se produce automáticamente una creciente centralización en la que va imponiéndose una «moda» (aquí, un centro), como ya vimos en la física. Estamos ante un caso típico de inestabilidad de crecimiento. Que este crecimiento continúe dependerá, entre otras cosas, de los medios de transporte disponibles. También aquí pueden aparecer interesantes transiciones de fase. Si el número y la velocidad de los medios de transporte crecen en una proporción que sólo permite que los habitantes de la periferia más inmediata puedan viajar al centro en un tiempo aceptable, las ciudades irán extendiendo probablemente sus barrios periféricos. Unos medios de transporte muy eficaces, en cambio, pueden permitir la formación de asentamientos satélite, que en parte tendrán un carácter de ciudades dormitorio.

Según se puede observar sobre todo en EE.UU., pero parcialmente también en la República Federal de Alemania, el automóvil desempeña un papel primordial en este proceso. Puesto que en las zonas de gran densidad demográfica los precios de los solares se disparan, la población se ve empujada hacia el extrarradio, en busca a la vez de las zonas verdes. A menudo los nuevos barrios de viviendas cuentan con servicios insuficientes y ante todo carecen (casi) por completo de transportes públicos para trasladar a los habitantes a sus lugares de trabajo. Éstos tampoco serían rentables, porque los nuevos habitantes viven todavía muy diseminados. El único medio de transporte eficaz para las nuevas urbanizaciones es el coche particular. Sólo gracias a él puede huir mucha gente de la gran ciudad. Pero al mismo tiempo comporta una separación entre el lugar de trabajo y el de vivienda, lo cual acarrea ventajas e inconvenientes. Debido a la mayor movilidad individual también se modifica la estructura económica, como hemos visto en el ejemplo de la acumulación de tiendas. Muchas veces la «tienda de doña María» ni siquiera llega a fundarse, y en su lugar aparecen centros comerciales con grandes aparcamientos.

Una vez formados los nuevos asentamientos, es importante ampliar la red de comunicaciones, ya sea mediante carreteras para el tránsito de automóviles, ya a través de transportes públicos eficientes que pueden ser rentables después de una fase inicial. Como en todos los estados de orden sinergéticos, los distintos componentes del sistema condicionan mutuamente su existencia. Así lo demuestran los medios de transporte suburbano. Para que sean rentables deben contar con un número suficiente de usuarios; pero la población sólo se sirve de ellos (por ejemplo, del ferrocarril suburbano rápido) si circulan con la suficiente frecuencia. La fase inicial es siempre deficitaria.

Al respecto es interesante observar la lucha competitiva entre el automóvil y el ferrocarril. En Estados Unidos, el coche particular ha desplazado en gran medida al tren, cosa que les llama inmediata y desagradablemente la atención a muchos europeos al llegar a Norteamérica. Recíprocamente, una de las primeras cosas que hace un norteamericano en Europa es alquilar un coche, para asombro de muchos europeos que en su lugar hubieran viajado en tren.

Evidentemente existen concepciones muy diferentes de cómo «avanzar».

En todos estos fenómenos debemos ser muy prudentes con los juicios definitivos. El automóvil nos ha aportado espacios libres, ya en la vida laboral, ya en las formas de esparcimiento, con las que en tiempos pasados no hubiéramos osado siquiera soñar. Por otra parte ocasiona problemas de energía, gases de escape, etc. En vista de las múltiples interrelaciones entre los más diversos componentes de una estructura vital me parece un error condenar globalmente al automóvil o considerarlo el único medio de transporte válido. Es importante juzgar más matizadamente sin perder de vista la situación global. Con harta frecuencia las mismas personas que en su viaje de vacaciones se irritan por la insuficiencia de la red de comunicaciones, participan en su lugar de origen en una acción de protesta contra la construcción de una nueva carretera.

Lamentablemente razones de espacio nos impiden ahondar en estas interesantes problemáticas, pero creemos que estas observaciones ya pueden inducir al lector a no considerar ni las cuidados ni los medios de transporte como algo inmutable, sino como entes que han ido formándose con el

tiempo y están sometidos a un incesante y todavía rápido proceso de cambio.

Dirección de empresas: ¿hacer lo que hace la competencia?

La cuestión del comportamiento de los vendedores de helados ilumina inmediatamente una problemática vinculada en las ciencias económicas a la teoría del *business management.* La dirección de una empresa debe estructurarla y orientarla de la mejor forma posible y llevar a cabo una política de ventas óptima. Las decisiones que debe tomar la dirección de una empresa son muy diversas y, por lo menos en las teorías habituales, se dejan a su libre albedrío. No obstante, el ejemplo del vendedor de helados ya muestra que una decisión de una empresa puede verse ciertamente afectada por la decisión de otra empresa. Una de las causas de que así ocurra reside en que las decisiones tienen siempre consecuencias inseguras que dependen, por ejemplo, de la situación económica general, de la aceptación de un producto nuevo por parte de los clientes, etc. Desde luego, las empresas intentan reducir estas inseguridades mediante estudios de mercado y con la publicidad.

Los efectos sinergéticos tienen aquí un papel esencial. Cuando se introduce un producto nuevo, muchas veces estará protegido por una patente. Sin embargo, su difusión se puede ver favorecida si lo presentan simultáneamente varias empresas. Las empresas se ayudan unas a otras al llamar la atención sobre ese producto. Este efecto sinergético naturalmente se puede invertir cuando el mercado tiende hacia la saturación. Nos hallaremos entonces ante el comportamiento característico de sistemas con recursos limitados. Ya hemos ido viendo varios de estos casos a lo largo del libro, como por ejemplo en la formación de las modas láser y particularmente en la teoría darwiniana de la evolución.

Según se ha visto, el incremento de la competencia se puede resolver de distintas maneras: por una parte, a través de una creciente especialización (por ejemplo, en la fabricación de productos altamente sofisticados); por la otra, a través de una considerable ampliación de la oferta (generalización). La industria del automóvil ofrece ejemplos bien conocidos. El primer caso sería el de una empresa que produjera exclusivamente coches de-

portivos con una línea muy especial; en el segundo caso, la empresa ofrecería una amplia gama de automóviles, desde el utilitario hasta el lujoso coche oficial.

Estas observaciones ya ponen de relieve el hecho de que en el caso de un sistema económico generalmente no nos hallamos ante un problema estático, sino ante un constante vaivén de procesos de muy diversa índole.

Debido al riesgo que entrañan las decisiones también ocurre que las direcciones de empresas observen «qué hace el otro», lo cual conduce finalmente a una especie de comportamiento colectivo de los empresarios sin necesidad de un acuerdo expreso.

Quisiéramos señalar ya aquí un aspecto fácilmente comprensible desde el punto de vista de la sinergética. Tanto en las teorías económicas como en la sociología aparece repetidamente el concepto de conspiración. Efectivamente, diríase que otros empresarios u otros sectores (por ejemplo, los compradores) se han conjurado contra un empresario determinado.

Más adelante veremos que el comportamiento colectivo provoca automatismos a los que no puede escapar el individuo; parece entonces como si todo el mundo, o por lo menos determinado grupo, estuviera conspirando contra él. Un ejemplo concreto aclarará en seguida que lo decisivo no son la buena o mala voluntad, sino los hechos generados por el colectivo.

Bienestar y depresión económica: las dos caras de la moneda

Para ello nos ocuparemos de un problema que solemos olvidar en las épocas de bienestar económico, pero que se vuelve muy angustioso en los períodos de crisis. Nos referimos al problema de la subocupación o, dicho más claramente, del desempleo. Naturalmente, las ciencias económicas se ocupan mucho de esta problemática, ante la cual se ha ido produciendo en los últimos años un cambio en las ideas. En el pasado, la economía se consideraba una estructura estática. Los expertos utilizaban términos como rentabilidad o elasticidad. ¿Cuál es la capacidad de adecuación de una empresa si cambian levemente las posibilidades de venta, por ejemplo? Actualmente empieza a prevalecer una concepción dinámica de la economía en el sentido de un proceso evolutivo, lo cual coincide, desde luego, con los planteamientos generales de la sinergética, en la cual no aceptamos las estructuras como algo dado, sino que intentamos comprenderlas a partir de

su formación. En las páginas siguientes partiremos de un modelo matemático de Gerhard Mensch, fácilmente traducible a los métodos generales de razonamiento de la sinergética.

Todos sabemos —y lo fundamentan economistas como Haberler y muchos otros— que el desarrollo industrial atraviesa fases de bienestar y depresiones. Las transiciones entre estas fases pueden ser muy marcadas. A partir de los múltiples ejemplos de los capítulos anteriores ya sabemos que en muchos sistemas incluso pequeños cambios en las condiciones ambientales, que denominamos «controles», pueden provocar modificaciones espectaculares en el ordenamiento global. A continuación analizaremos el problema del pleno empleo a la luz de esos conocimientos. Antes de rastrear las causas más profundas de estas transiciones de fase mencionaremos algunas constataciones importantes de la investigación económica empírica.

¿Las innovaciones técnicas son siempre el motor de la economía?

En este libro hemos visto continuamente que en el comportamiento de los más diversos sistemas existen dos zonas bien diferenciadas. Dentro de ciertos márgenes, una lámpara o una capa líquida, por ejemplo, se comportan de manera normal; es decir que si las perturbaciones no son demasiado fuertes, prácticamente mantienen su comportamiento. Pero también existen esas zonas tan interesantes en las que un sistema se vuelve inestable y quiere pasar a un estado distinto. El momento y la manera en que se produzca esa transición dependerán frecuentemente de fluctuaciones casuales. Idéntico comportamiento se observa también en los modelos económicos que estamos tratando.

Pero ¿quién asume en la vida económica el papel de las fluctuaciones, el papel del factor desencadenante, por así decirlo? Uno de estos factores lo constituyen las innovaciones en la economía, y muy especialmente las basadas en algún invento. Nos referimos aquí a inventos como el del motor de gasolina, el avión o el teléfono, pero también a un nuevo modelo de aspirador. Un amplio grupo de invenciones que nos llaman menos la atención, pero que también son muy importantes, es el de las que simplifican la producción. En la terminología económica se denominan innovaciones,

que es la palabra que emplearemos en lo sucesivo. Partiremos de las observaciones realizadas en el estudio empírico de las innovaciones. Según tales estudios, una primera fase comienza con innovaciones fundamentales que crean nuevos ramos de la industria. Un ejemplo gráfico lo constituye la invención del automóvil. Estas innovaciones suelen aparecer en grupo, es decir, acumuladas. Les siguen otras, destinadas a mejorar la producción en los nuevos sectores de la economía. El auge de un nuevo sector económico arrastra a los demás, de manera que la situación económica general lleva al bienestar. Esto ocurre de distintas formas, entre otras a través de un alto nivel de empleo y el consiguiente aumento del poder adquisitivo de la población, la creación de empresas de suministros, etc. Además, según los resultados de las investigaciones económicas, en los países europeos industrializados, a fines de la década de los cuarenta y durante los años cincuenta las innovaciones que permitieron la fabricación de *nuevos productos* superaron con creces la introducción de nuevos *procesos de fabricación.* En los años sesenta tuvo lugar finalmente, un desplazamiento de las innovaciones; se modificaron ante todo los procesos de fabricación, hecho que puede caracterizarse esencialmente con la palabra de moda: *racionalización.* El denominador común de todas las actuaciones económicas se puede describir sencillamente como la búsqueda de beneficios. Una discusión al respecto suele no estar exenta de emociones, como en el caso de un automovilista que piense en las ganancias obtenidas gracias a un aumento en el precio de la gasolina. Pero dejemos aquí de lado las emociones y pensemos en que una disminución de la tasa de ganancia finalmente se convierte en pérdidas, las cuales pueden originar una falta de estabilidad en los puestos de trabajo. Aquí estudiaremos exclusivamente los aspectos económicos. Para que una empresa obtenga beneficios debe vender un número suficiente de productos. Los aumentos de salarios menguan los beneficios y repercuten sobre los precios, lo cual pueden originar un problema agudo de competitividad. Al mismo tiempo, la ampliación de la producción está a menudo ligada a la introducción de nuevos productos, que al principio resulta costosa. Ambos factores —los salarios más elevados y el intento de evitar que la introducción de nuevos productos sea costosa— llevan a que las inversiones no se orienten hacia la expansión —es decir, hacia un aumento de las ventas—, sino hacia la racionalización. Las empresas prefieren las innovaciones encaminadas a mejorar el propio proceso de fabricación frente a las que crean

nuevos productos. Una empresa automovilística prefiere introducir una nueva máquina de soldar automática antes que un nuevo modelo de coche.

Sobre la base de datos empíricos, G. Mensch estableció, como mencionábamos antes, un modelo matemático derivado de la llamada teoría de las catástrofes. Este modelo describe la transición observable en el paso del pleno empleo al subempleo. Por mi parte, he traducido este modelo al lenguaje de la sinergética y lo he ampliado. Ejemplos como el del láser o el de los «rollos» de los líquidos nos mostraban que una representación gráfica nos permite leer casi inmediatamente qué estados de equilibrio se establecen si modificamos las condiciones exteriores. La figura 12.1 muestra la evolución del esfuerzo sinergético cuando modificamos la producción, que designaremos como magnitud *x*.

Suponemos que la economía se encuentra inicialmente en un estado de equilibrio. Ahora estudiaremos cómo se modifica el esfuerzo sinergético si modificamos la producción. Dado que por el momento se trata de una situación de equilibrio estable, la evolución de la curva es la de la figura 12.1.

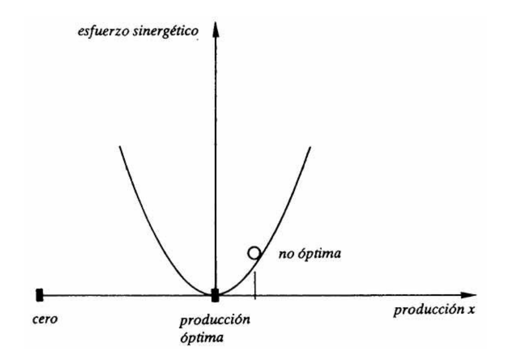


Fig. 12.1: evolución del esfuerzo sinergético al variar la producción, indicada por la magnitud *x*.

A continuación estudiaremos el cambio que se produce en la curva de esfuerzo si introducimos inversiones que provocan una ampliación de la producción. Dado que queremos lograr un aumento en la producción, la curva deberá desplazarse evidentemente hacia valores de producción más elevados, es decir que se obtendrá una curva como la representada en la figura 12.2. Inversamente, las medidas que reducen la producción dan una curva desplazada hacia la izquierda.

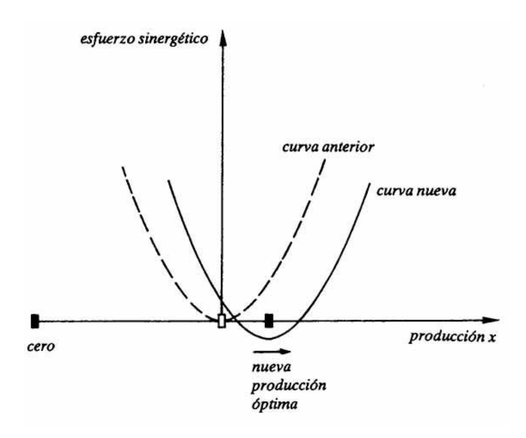


Fig. 12.2: con inversiones que amplían la producción la curva de esfuerzo se desplaza de manera que la producción *x* aumenta.

Veamos ahora qué ocurre cuando las empresas racionalizan. La racionalización puede tener dos efectos distintos, como nos lo podrán aclarar algunos ejemplos. Las nuevas máquinas reemplazan mano de obra, con lo cual disminuyen los costos de producción. Ello permite que la empresa siga obteniendo beneficios aun cuando disminuya su producción de mercancías. En ese caso, la racionalización apunta a una producción menor. Pero también puede encararse de modo que las mercancías se abaraten y el mercado las absorba en mayor cantidad. Ambas posibilidades, tanto la producción reducida como la incrementada, se pueden representar mediante la curva sinergética de la figura 12.3 y no son nada nuevo para el lector.

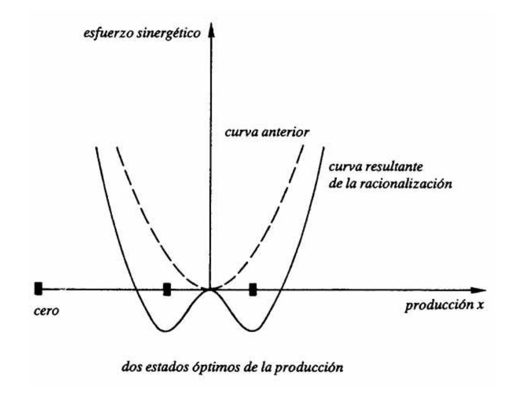


Fig. 12.3: las medidas racionalizadoras llevan a dos estados óptimos de la producción: una producción incrementada o disminuida.

Nuestra gráfica muestra claramente que debemos abandonar la tesis de *una sola* posibilidad de equilibrio de la economía. Aquí son posibles dos estados estables, por completo equivalentes desde un punto de vista puramente económico. La caracterización de «estables» significa que las situaciones no sufren un cambio esencial al introducir una perturbación exterior. Naturalmente también podría intentarse quebrar la simetría de antemano mediante intervenciones externas, de manera que el esfuerzo sinergético resulte desigualado por medios artificiales, tal como se representa en la figura 12.4. En seguida discutiremos la forma de lograrlo.

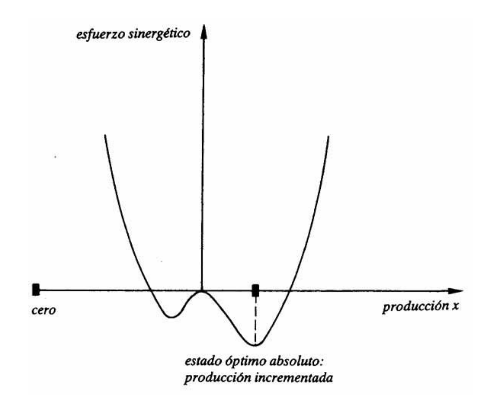


Fig. 12.4: por la acción conjunta de medidas racionalizadoras e inversiones que amplían la producción se obtiene un estado óptimo absoluto, relacionado con una mayor producción.

En el caso de la economía se plantea la dificultad adicional de que el capital disponible para la inversión en innovaciones es limitado. La disminución de las inversiones lleva a un desplazamiento de la curva en el sentido de una menor producción. Si combinamos las medidas de racionalización con una inversión reducida obtendremos la gráfica de la figura 12.5. Aquí se observa que la situación económica esté determinada unívocamente en este caso por el mínimo izquierdo, es decir, por una menor producción, y por tanto indirectamente también por un menor nivel de empleo.

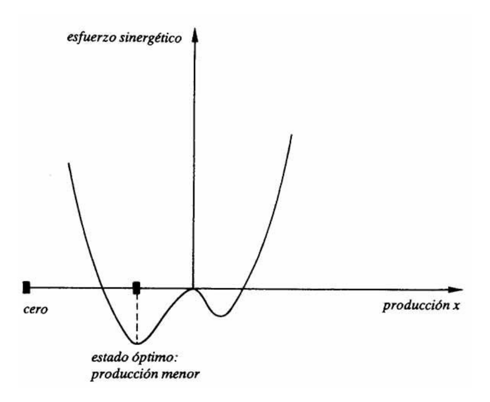


Fig. 12.5: en el caso de una reducción de inversiones ampliadoras de la producción combinada con medidas racionalizadoras, para las empresas resulta más favorable una situación de menor producción *x.*

Esta descripción aclara una conclusión a la que ya había llegado G. Mensch: para aprovechar la racionalización en el sentido de una mayor producción y lograr así el pleno empleo, simultáneamente deberían efectuarse también inversiones destinadas a incrementar la producción, para hacer realidad la curva de la figura 12.4 (fig. 12.6). Pero la producción incrementada sólo será absorbida por el mercado si lleva aparejadas innovaciones orientadas hacia productos novedosos.

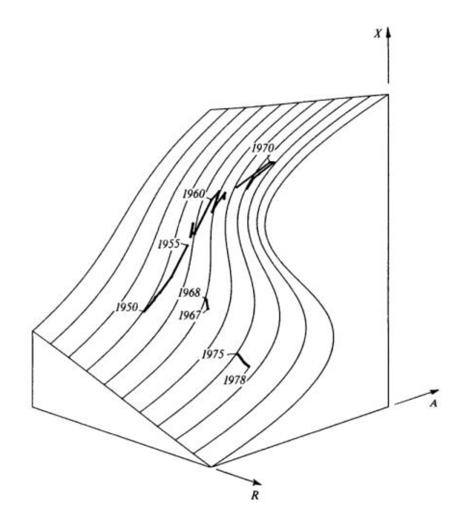


Fig. 12.6: esta gráfica resume los resultados de G. Mensch y sus colaboradores. Muestra cómo cambia la dimensión «óptima» de la producción cuando se realizan inversiones respecto de la racionalización (R) y la ampliación (A). Los años se refieren a la producción en la República Federal de Alemania. Nótense los marcados saltos hacia una producción insuficiente.

Con estas explicaciones, que a la postre han resultado bastante técnicas, intento mostrarle al lector la utilidad de los razonamientos de la sinergética para describir hechos bastante complejos con relativa simplicidad y poner claramente de relieve sus consecuencias. Por lo demás, igual que en los restantes capítulos, no debemos engañarnos sobre el hecho de que una teoría completa de tales procesos abarcaría un volumen entero para cada tema, tarea que desde luego, no podemos abordar aquí. En realidad, este libro sólo pretende ofrecer estímulos para seguir desarrollando estos razonamientos y mostrar cómo se pueden idear modelos incluso para procesos complejos. Para lo cual debe tenerse muy presente que, además de la matematización, también es importante la interpretación de las premisas y los resultados. Así, al hablar de la disminución de las ganancias, decíamos que ésta también puede deberse al aumento de los salarios. Recíprocamente, un aumento de salarios está destinado, al menos en parte, a compensar la subida de los precios, debido al alza de los costes de producción más elevados, provocada a su vez por el incremento de los salarios. Así se origina la conocida espiral de los precios y los salarios. Ya que un fenómeno condiciona el otro, desde el punto de vista de la sinergética resulta bastante ocioso buscar un culpable. Lo que debe aprenderse es que la espiral de los precios y los salarios, por ejemplo, origina una modificación en los parámetros que puede implicar un vuelco súbito en los procesos económicos, según acabamos de ver.

Cambios colectivos repentinos en la vida económica

La comparación de la curva de esfuerzo sinergético (que acabamos de describir) con datos empíricos señala que la economía aparentemente está en condiciones de detectar la formación de un mínimo más bajo en esa curva y de reaccionar «saltando» a ese nuevo mínimo (figura 12.7). Sin embargo, es interesante observar que ese «salto» se produce a menudo con retraso. En las ciencias económicas frecuentemente tampoco queda claro qué motiva ese salto. En general se buscan causas externas, como por ejemplo un aumento del precio del petróleo. Pero en los comportamientos inversores de las empresas antes descritos diríase más bien que las causas determinantes fueron internas. La situación económica había cambiado

tanto que el salto era ya más que necesario, pero nadie se atrevía a darlo. Se trata de efectos conocidos también en física, en el caso del agua sobreenfriada. El agua ya se encuentra por debajo del punto de congelación y hace tiempo que debería haberse convertido en hielo. Sin embargo, se halla en un estado que se denomina metaestable. Sólo una fluctuación espontánea o un pequeño impulso exterior la harán congelarse al instante.

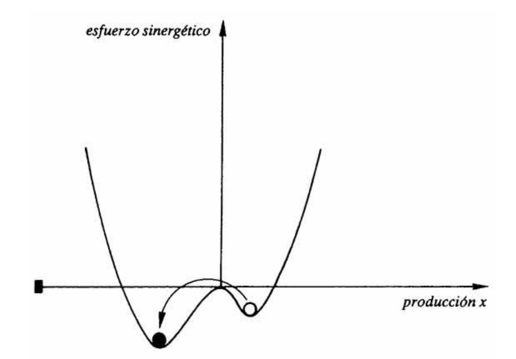


Fig. 12.7: salto de la economía de una situación relativamente favorable a una absolutamente favorable para las empresas respecto de los beneficios y el esfuerzo sinergético, pero no respecto del nivel general de empleo.

En economía ocurre algo parecido. Sólo que aquí los procesos pueden iniciarse desde dentro del sistema: *una* empresa puede decidirse a dar determinado paso en vistas a una racionalización. Pero al estar las condiciones ya más que maduras, todas las demás empresas seguirán de inmediato su ejemplo. La actuación de la primera empresa habrá sido como una fluctuación y habrá tenido el efecto de una señal. Según parece, a muchas de esas actuaciones se les atribuye embellecedoras causas «externas». Pero esas causas externas son demasiado insignificantes para poder justificar decisiones de tal magnitud. La verdadera causa está en la situación económica *general*, que asume ahora el papel de «parámetro de control». Las causas «externas» son sólo el impulso, en el sentido estricto de la palabra, que hace rodar hacia abajo la esfera de la figura 4.16 a lo largo de la curva de esfuerzo sinergético; pero las causas «internas», es decir, la situación económica general, ya habían alterado mucho antes la curva de esfuerzo sinergético. La esfera ya no estaba en posición «correcta», estable. A menudo resultará imposible separar nítidamente las causas externas (impulsos) de las internas. Por ejemplo, es perfectamente posible que unos continuos aumentos del precio del petróleo conduzcan a una alteración sistemática de la

curva de esfuerzo sinergético, originando así una situación económica totalmente diferente; en ese caso, el propio precio del petróleo se habrá convertido en un parámetro de control.

Estas observaciones también explican por qué muchas empresas del mismo ramo suelen actuar de manera muy similar en un brevísimo espacio de tiempo. Si una de ellas se sustrajera a este modo de actuación, obraría en contra de la tendencia general de la economía y se situaría en un punto muy desventajoso de la curva de esfuerzo sinergético.

Como vemos, no es forzoso que decisiones aparentemente colectivas sean producto de un acuerdo entre las empresas (como tienden a sospechar los organismos anticartel). Por supuesto, tampoco pretendemos asegurar que jamás existan tales acuerdos previos.

Las racionalizaciones (y otras medidas) no tienen que ser forzosamente una *consecuencia* de la situación económica. Las empresas también pueden racionalizar cuando *esperan* una contracción del mercado o una agudización de la lucha competitiva. Además, la propia racionalización, puede provocar una contracción del mercado; por ejemplo, cuando como consecuencia de los despidos disminuye el poder adquisitivo general. En ese caso, causa y efecto se confunden.

De lo cual también resulta que no puede haber una respuesta unívoca a la pregunta de cómo sacar a la economía de un equilibrio de subempleo, ya que ésta depende de fenómenos muy complejos. La conclusión de G. Mensch, en el sentido de que un incremento de las inversiones que tienen un efecto ampliador de la producción conduce a otra situación estable con pleno empleo, no es siempre válida, porque puede ocurrir que el mercado no esté en condiciones de absorber toda esa producción. La vida económica también puede verse impulsada por un aumento de la capacidad adquisitiva, gracias, por ejemplo, a una reducción de los impuestos.

Como habrá observado el lector, ya nos hemos adentrado profundamente en el terreno de la teoría económica. Pero seguimos reconociendo el principio básico de que unas modificaciones mínimas de las condiciones pueden originar equilibrios totalmente diferentes.

La economía es más compleja de lo que Adam Smith pensaba

Estas pocas consideraciones ya contradicen los dogmas de la tradicional teoría del liberalismo económico que se remonta a Adam Smith. Este partía del supuesto de que en condiciones de libre competencia siempre se llega

a una situación de equilibrio, la cual es, además, la única posible, según se creía entonces. Nosotros, en cambio, ya hemos conocido el caso contrario de dos equilibrios posibles. A la economía en su conjunto le resulta muy difícil saltar *motu proprio* de una a otra situación de equilibrio, pues en general ello sólo es posible a través de un accionar colectivo. En realidad, la vida económica es aún mucho más compleja. Se da, por ejemplo, el caso de que una economía fluctúe constantemente entre distintas situaciones de equilibrio, y que el pleno empleo y el subempleo se alternen periódicamente.

Control estatal: ¿maldición o bendición?

Dado que, como vimos, en la vida económica aparecen determinados automatismos que pueden provocar también fenómenos no deseados, como por ejemplo el desempleo, debemos plantearnos inmediatamente la pregunta de si no podrían impedirse tales fenómenos mediante controles exteriores, es decir, estatales. Debemos tener presente, por supuesto, que el concepto de control puede abarcar un amplísimo espectro de medidas. Pensemos concretamente en el caso de un sistema físico como el láser. Con la modificación de un solo parámetro ambiental: la intensidad de la corriente suministrada, podemos lograr que los átomos se autoorganicen para emitir una luz coherente. Por tanto, ejercemos un control nada específico, que afecta a todos los átomos por igual y que sin embargo provoca un comportamiento ordenado muy detallado del láser. La otra posibilidad consistiría en gobernar desde fuera cada átomo por *separado,* por ejemplo mediante campos luminosos especiales, de manera que todos los átomos irradiaran al mismo ritmo. Este segundo procedimiento exigiría sin duda un esfuerzo insume. Tendríamos que dirigir y controlar directa y específicamente cada uno de los átomos. En la esfera económica ocurre algo muy similar con la posibilidad de control y su efecto sobre la economía. Con modelos de funcionamiento se puede demostrar fácilmente que sería muy costoso controlar y dirigir procesos individuales, de manera que los controles resultarían a la postre más caros que los ahorros conseguidos, p. ej. a través de una adecuación mutua de los fenómenos. Lamentablemente, muchos organismos estatales y sobre todo la burocracia no han llegado a la misma conclusión.

Lo general del láser es precisamente que con muy poco esfuerzo, es decir, sin siquiera estar informados en detalle de su situación, podemos lograr con una medida muy simple que los átomos se autoorganicen. Tampoco cabe duda de que son justamente los expertos económicos más sagaces quienes abogan por este punto de vista en su especificidad, es decir, la aplicación de controles que demanden *el menor esfuerzo posible* para encarrilar la vida económica. A pesar de ello resulta fácil comprobar que el Estado nos asalta con una plétora de controles de la más diversa índole, en forma de impuestos muy diferenciados y leyes detalladas, por una parte, y subvenciones y prerrogativas otorgadas a sectores muy determinados, por la otra.

Seleccionemos al respecto dos ejemplos, uno de los cuales es políticamente explosivo.

Debido a los destrozos causados por la guerra, el gobierno tuvo que subvencionar la construcción de casas. En un caso así encontramos las dos posibilidades de control que acabo de mencionar. En una de ellas es el Estado el que aporta todo el dinero para construir las viviendas. La otra vía consiste en guiar todo el proceso mediante un parámetro de control; el propio parámetro de control no constituye un peso financiero muy gravoso, pero dirige la corriente de capitales en la dirección adecuada. Estos parámetros son la concesión de privilegios fiscales a los particulares que quieran construir viviendas. De esta manera, los particulares invierten sus capitales en la dirección adecuada, sin que el Estado, es decir, la comunidad de todos, deba aportar todo el capital.

El segundo tema, políticamente explosivo, son las leyes de protección a los arrendatarios. Sirven sobre todo a la necesidad social de la «protección del arrendatario contra la rescisión de contratos». Al mismo tiempo, la propia estructuración de estas leyes origina una congelación de los alquileres en determinado nivel, lo cual no sólo es fácil de comprobarse, sino también rigurosa y matemáticamente demostrable. La congelación de los alquileres despoja a los arrendadores del aliciente para construir más viviendas, pues éstas pierden muy pronto su rentabilidad. Esta situación desemboca en un fuerte déficit habitacional porque los particulares prefieren invertir en otros sectores de la economía que prometan mayores beneficios.

El ejemplo señala una clara situación de conflicto en el sentido de una bifurcación. El legislador tiene que decidirse por una de las alternativas y

fijar prioridades. Aquí se ve patentemente que las legislaciones ejercen una influencia directa sobre el acontecer económico, aun cuando no haya sido ésta la intención del legislador.

Ahora sin duda muchos lectores esperarán que la sinergética ofrezca una receta universal para la supresión de tales dificultades. Pero ello no es así de ninguna manera, y no porque la sinergética no esté suficientemente desarrollada, sino por todo lo contrario. En el marco de la sinergética vimos numerosos ejemplos en los que había situaciones conflictivas donde, por principio, una de las soluciones excluía la otra. Lo único que eventualmente puede hacerse es atenuar los conflictos mediante diferenciaciones más precisas. Pero esto puede significar tamaño esfuerzo exterior que no valga la pena hacerlo.

Mencionemos un último ejemplo de intervención estatal que puede tener consecuencias insospechadas. Este libro ha mostrado una y otra vez que modificaciones incluso pequeñas de las condiciones ambientales pueden generar cambios drásticos en todo el sistema. Una de esas condiciones ambientales, que aparece aquí como condición de vida, es para los ciudadanos el ya mencionado sistema de contribuciones. Hay circunstancias en las que unos impuestos levemente más altos pueden modificar por completo el comportamiento de la población respecto del consumo, de donde resultarán muy pronto situaciones económicas globales enteramente nuevas; por ejemplo, un nivel de desempleo mucho más elevado.

Personalmente temo que una serie de políticos todavía no sea consciente de que pequeñas modificaciones ambientales (es decir, de las condiciones de vida) pueden provocar cambios radicales en la situación de todo un sistema.

El caos económico provocado por controles desacertados

Señalemos por último un hecho que parece una blasfemia en opinión de muchos expertos en economía, pero que tiene un fundamento matemático y sin duda ingresará dentro de poco en las ciencias económicas. Los ejemplos de la física y la química nos muestran que también pueden desarrollarse de manera caótica precisamente los procesos controlados. Recordemos las reacciones químicas que se desarrollan de forma periódica con un viraje del color de la sustancia del rojo al azul y viceversa. Ese viraje puede

parecemos demasiado lento. A modo de control vamos agregando entonces periódicamente una sustancia para que el período de viraje se acorte. En este caso se puede demostrar tanto experimental cuanto teóricamente que el comportamiento puede cambiar por completo. En lugar de un viraje regular y periódico parece un cambio de colores totalmente irregular y caótico.

Lo mismo ocurre en los sistemas altamente complejos de la economía. En realidad debemos esperar que las medidas de control que no tengan en cuenta las particularidades del sistema puedan provocar procesos auténticamente caóticos.

En las ciencias naturales y en la biología hay toda una bibliografía sobre comportamientos caóticos, y los especialistas en economía harían bien en ocuparse de esta problemática.

¿Afianzan la paz los vínculos económicos más estrechos?

Toda una serie de fenómenos de la economía permite establecer una analogía con los de sistemas físicos. Esta analogía se basa en el hecho de que al menos en cierta medida la economía se puede describir con la ayuda de leyes matemáticas; la similitud de las relaciones matemáticas permiten luego traducir las analogías en afirmaciones. En ese sentido también hemos observado modelos que se ocupan de una problemática de gran interés en la actualidad, a saber: ¿afianzan la paz los vínculos económicos más estrechos?

En muchos lugares existe hoy día la tendencia a establecer vínculos económicos estrechos precisamente entre sistemas políticos antagónicos, con el fin de consolidar así la paz mundial. La formulación matemática de tales procesos me condujo a un resultado que al principio me sorprendió grandemente, pues mostraba que no existe exclusivamente el caso de una mayor estabilidad debida a vínculos más estrechos, sino que incluso una situación que antes del reforzamiento de los vínculos era estable podía desestabilizarse repentinamente y derivar en catástrofe.

La interpretación de la estabilización hoy día ya pertenece, poco más o menos, al patrimonio político universal. Cada uno de los socios ve que los vínculos económicos estrechos coadyuvan a su propio bienestar, y por eso

no quiere ponerlos en peligro sino continuar desarrollándolos en la medida de lo posible.

¿Es entonces el modelo matemático el que falla en el segundo caso, en el de la inestabilidad, o subyacen aquí causas más profundas?

A lo largo de este libro hemos visto que las inestabilidades sólo se vuelven activas cuando aparecen determinadas fluctuaciones. En la coexistencia entre los pueblos estas fluctuaciones se deben p. ej. a diversos tipos de crisis, que pueden ser de naturaleza económica, política o militar.

Las crisis pueden ser incluso totalmente locales. Pero a consecuencia de tales fluctuaciones la parte contraria puede tomar medidas en forma de represalias económicas que reciben su correspondiente réplica, de lo cual resulta un aumento explosivo del conflicto.

Como se desprende de este modelo, lo menos que podemos decir es que los vínculos económicos más estrechos no conducen automáticamente a una mayor estabilidad política.

Más bien parece necesario —y con ello abandonamos los aspectos puramente matemáticos— concretar la estabilidad sobre una base más profunda, que sólo debe de poder alcanzarse a través de una mayor confianza mutua.

Reconocer leyes sinergéticas en beneficio de la humanidad

Una serie de ejemplos concretos nos había mostrado que los procesos económicos suelen tener unos parecidos asombrosos con los de campos totalmente distintos como la física o la química. En esos casos el comportamiento colectivo desempeña un papel determinante. A raíz del comportamiento colectivo, sin embargo, pueden presentarse fenómenos que se apartan mucho de la teoría económica clásica en el sentido de la existencia de un equilibrio como el que concebía Adam Smith. No cabe ninguna duda de que en el futuro la teoría económica deberá ocuparse crecientemente de estos fenómenos y métodos novedosos de la sinergética para que le ayuden a comprender y luego a organizar mejor el acontecer económico. Con todo, no debemos pasar por alto la circunstancia siguiente: al igual que cualquier otra teoría de las ciencias económicas y, en particular, de las ciencias sociales, la sinergética se ve confrontada con el problema de la *interpretación* de sus resultados matemáticos. La causa principal de que ello sea así reside

en el hecho de que todos los procesos económicos poseen amplias implicaciones sociales; intervienen profundamente en la vida de cada individuo, tanto en su vida profesional como en su vida privada. En parte esto tiene como consecuencia que las formulaciones matemáticas sean rechazadas desde un principio. A la vez nos encontramos con el término de «tecnócratas», empleado generalmente con un sentido peyorativo; en ocasiones debemos rechazarlos porque sus conclusiones a veces se contradicen con los razonamientos ideológicos que son frutos de deseos. Pero debemos convencernos de que en una serie de procesos de los sistemas complejos —y la economía es uno de ellos— hay cursos inevitables de los que no podemos huir en función de nuestros deseos ideológicos. En realidad debemos estudiar el funcionamiento de esos automatismos para poder aprovecharlos desde una perspectiva más elevada en beneficio de toda la humanidad.

XIII. ¿PUEDEN PREDECIRSE LAS REVOLUCIONES?

En su novela de ciencia-ficción *La Fundación*, el conocido escritor norteamericano Isaac Asimov crea el personaje del científico Seldon que es capaz de prever el comportamiento de las masas humanas con varios siglos de antelación. Más aún, se halla en condiciones de predecir las revoluciones.

Desde luego, este problema no interesa exclusivamente a los futurólogos. A menudo nos sería muy valioso también a nosotros, y no digamos ya a los políticos, poder formular semejante pronóstico aunque sólo fuera con unos pocos años de anticipación.

Revolución significa un cambio radical en el que un ordenamiento político es reemplazado por otro. La palabra «ordenamiento» nos lleva de inmediato al tema central de la sinergética. ¿Cómo se crea un orden por la interacción de las partes de un sistema? En el presente capítulo esto significa: ¿cómo se forma un ordenamiento político a partir de la interacción de los ciudadanos individuales?

La opinión pública como «ordenador»

Inmediatamente volvemos a encontrarnos con la peculiar interrelación entre los individuos y el Estado de orden. El Estado ordenado esclaviza a los individuos, y éstos, a su vez, mantienen vigente el Estado ordenado. Investigaremos esta interrelación en un tema candente de la sociología: la formación de la «opinión pública».

Nuestra tesis es la siguiente: la opinión pública dominante desempeña el papel de ordenador que esclaviza las opiniones individuales; impone, por tanto, una opinión pública considerablemente unitaria, con lo cual contribuye a su propia supervivencia.

Naturalmente, la tesis de que el individuo es esclavizado en sus opiniones requiere una fundamentación más profunda, y quiero mostrar que la bibliografía sociológica contiene referencias muy abundantes al respecto. En el terreno sociológico las circunstancias son ciertamente más complejas que en el láser o los líquidos, pues intervienen otras fuerzas, operan en

cierto modo otros subsistemas; a saber, los medios de comunicación de masas y los gobiernos. Sin embargo, como veremos de inmediato, las conceptualizaciones de la sinergética nos permiten abrirnos camino entre la jungla de los entrelazamientos múltiples y así obtener una imagen bastante clara de las interrelaciones entre las piezas que componen una sociedad.

Las tesis que aquí defenderemos son las siguientes:

1. Las personas son susceptibles a la influencia de una opinión dominante y tienden a adherírsele.
2. Las personas tienen en principio dos caminos para conocer la opinión de otras personas: el contacto directo y los medios de comunicación de masas.
3. Los medios de comunicación de masas llevan implícita su propia dinámica.
4. Entre los medios de comunicación de masas, la prensa es sensible a la influencia colectiva de los ciudadanos, concretamente a través de la conducta adquisitiva de sus lectores.
5. En los Estados democráticos el gobierno se ve marcado de un modo decisivo por la influencia de la opinión pública.

En el marco de la sinergética se ha hecho posible tratar una serie de estas interrelaciones entre ordenador y sistema esclavizado con la ayuda de modelos matemáticos y reproducir así, por ejemplo, la dinámica de la formación de la opinión. Veamos ahora cómo podemos servirnos de los conceptos de ordenador y esclavización para dilucidar las interrelaciones específicas que existen entre las diversas fuerzas sociales. Observemos la figura 13.1, que representa estas interrelaciones en forma de diagrama. Las flechas del diagrama indican influencias. A continuación observaremos estas relaciones con mayor detenimiento.

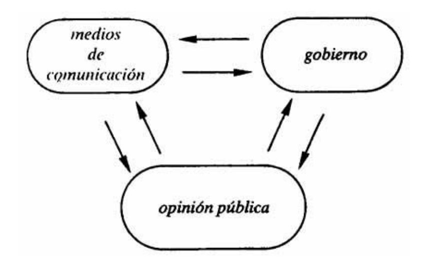


Fig. 13.1: interacción entre gobierno, medios de comunicación de masas y opinión pública.

La afirmación de que el ordenador esclaviza los subsistemas cobra una dimensión chocante en sociología, pues significa que la formación de la opinión del individuo se halla esclavizada por la opinión dominante (fig. 13.2). Esta afirmación es tan provocadora que estamos prontos a rechazarla como una extrapolación ilícita del dominio de las ciencias naturales al de la sociología. Pero no nos precipitemos en nuestro juicio; preguntemos a los propios sociólogos. En su obra *La espiral del silencio (Die Schweigespirale;* Piper, 1980), la conocida estudiosa de la opinión pública Elisabeth Noelle-Neumann recoge observaciones de los sociólogos más prestigiosos que confirman todas estas tesis. Teniendo en cuenta que en el curso de este libro hemos ido conociendo toda una serie de ordenadores y subsistemas esclavizados de muy diversa naturaleza tal vez ahora deberíamos empezar por buscar una definic queremos identificar al ordenador con la opinión política dominante; debemos preguntarnos, por tanto, qué es la opinión pública.

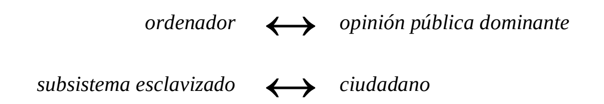


Fig. 13.2: la formación de la opinión del individuo es esclavizada por la opinión dominante.

La bibliografía sociológica contiene docenas de definiciones de este concepto. Dada la orientación básicamente científica de este libro deberíamos operar en lo posible con magnitudes mensurables y rechazar las concepciones difusas. En este sentido podemos conectar directamente con el proceder de los institutos que estudian las opiniones de la población, es decir, los institutos demoscópicos.

Estos centros establecen todo un catálogo de preguntas sobre problemas de candente actualidad: «¿Está usted a favor de la pena de muerte?», «¿Por qué partido votaría en este momento?», etc. Los encuestadores cuentan luego los votos a favor de uno u otro partido y obtienen así un cuadro de la distribución de las opiniones. De un diagrama de esa índole puede deducirse directamente cuál es la opinión política dominante. Es el equivalente del análisis de una estructura en el sentido científico tradicional (fig. 13.3).

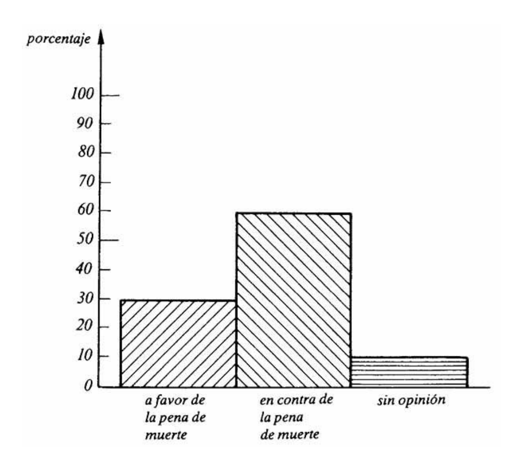


Fig. 13.3: ejemplo de la distribución de opiniones (estructura de la opinión).

Pero en sinergética se trata de comprender la *formación* de estructuras, es decir, su dinámica. Por tanto, debemos preguntarnos de qué manera llega a establecerse una distribución concreta de las opiniones políticas. En este contexto cabe considerar dos casos extremos: el del ciudadano completamente emancipado que se forja su propia opinión política sin dejarse influir por nadie y luego la defiende contra viento y marea, y el del que se deja influir por la opinión de los demás. En este último caso precisamente desempeñan un papel decisivo las interrelaciones o, en otras palabras, los efectos sinergéticos.

¿Son influenciables las personas?

Apoyándonos en material sociológico veremos en seguida que en la formación de la opinión debemos contar siempre con una susceptibilidad de las personas a las influencias externas. Por una parte, como en seguida veremos esto tiene su origen en la propia disposición psicológica del ser humano; pero por otra parte se trata de una reacción natural frente al medio. La civilización moderna ha situado al hombre en un entorno sumamente complicado, y en el que muchas veces no le resulta fácil orientarse. Empujado de una situación conflictiva a la siguiente, se le hace difícil hallar respuestas unívocas por sus propios medios. Por ello tiende a fijarse en las

acciones y opiniones ajenas. Experimentos sociopsicológicos han demostrado incluso que un porcentaje nada despreciable de personas se adhiere incluso a opiniones que ellas mismas deberían reconocer como objetivamente falsas (y quizás aún en caso de que así lo reconozcan). Tal vez el ejemplo más contundente lo ofrecen las experiencias realizadas por el sociopsicólogo estadounidense Solomon E. Asch, muy bien descritas en el libro de Elisabeth Noelle-Neumann:

«A comienzos de la década de los cincuenta se publicó en Estados Unidos el informe sobre una experiencia del sociopsicólogo Solomon Asch, repetida por éste en cincuenta ocasiones. La tarea de los sujetos de la experiencia consistía en comparar la longitud de diversos trazos con un segmento determinado. De cada tres segmentos, uno tenía exactamente la misma longitud que el modelo (fig. 13.4). Era una tarea sencilla —o así parecía a primera vista—, porque era fácil identificar el segmento coincidente. En cada una de las experiencias participaron de ocho a nueve personas. La experiencia se desarrollaba de la siguiente manera: una vez expuestos los tres trazos al lado del modelo a comparar, cada persona, de izquierda a derecha, decía cuál de los trazos correspondía, en su opinión, al trazo modelo. Cada experiencia constaba de doce presentaciones, doce repeticiones.

»A continuación se efectuaba la siguiente prueba: después de las dos primeras presentaciones, en la que todos los participantes coincidían en su identificación del trazo correcto, el director de la experiencia modificaba la situación. Sus colaboradores, al corriente del objetivo de la experiencia, señalaban con total coincidencia un segmento demasiado corto como el que correspondía al modelo. Luego se procedía a observar a un sujeto inocente, el único que nada sabía del asunto, sentado al final de la fila, para averiguar cómo se reaccionaría bajo la presión de una opinión mayoritariamente divergente. ¿Titubearía? ¿Se adheriría al veredicto de la mayoría, por más que contradijera su propio veredicto? ¿O defendería su propia opinión?

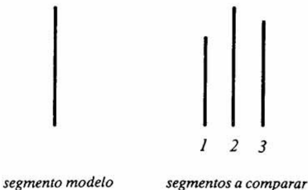


Fig. 13.4: la experiencia de Asch (cf. texto).

»Resultado: de cada diez sujetos experimentales, dos perseveraron en su impresión y dos se adhirieron sólo una o dos veces sobre diez a la opinión de los demás, pero los otros seis indicaron repetidas veces como opinión propia la opinión claramente equivocada de la mayoría. Lo cual indica que, incluso ante una cuestión inofensiva y en una situación bastante indiferente para ellas, que no afecta a sus intereses reales, la mayoría de las personas se adhieren a la opinión de la mayoría, aunque no les quepa duda de que es equivocada.»

En el sentido de la sinergética, esta susceptibilidad a las influencias es la raíz de todos los efectos colectivos en la formación de la opinión pública, con total independencia de cómo se desarrolle este fenómeno en detalle y cómo lo formulemos matemáticamente paso a paso. A resultas de normas completamente generales, que constituyen la base de la sinergética, se establece automáticamente una competencia entre las diversas opiniones, hasta que finalmente una de ellas se impone como dominante y triunfa en la lucha competitiva. Esto es especialmente patente en el caso de la moda, que no es sino una expresión de la opinión pública. La moda muestra además que en tales efectos colectivos a menudo no importan los valores objetivos, sino que el colectivo prefiere finalmente una tendencia subjetiva. Que las mujeres lleven faldas largas o cortas y los hombres pantalones anchos o estrechos es exclusivamente una cuestión de gustos, y no la consecuencia de profundos razonamientos (a no ser que los creadores de modas quieran avivar el negocio y logren aprovechar hábilmente el comportamiento colectivo en su propio beneficio). Esto no vale únicamente para los creadores de modas; sin duda también es el secreto del político afortunado que sabe aprovechar estas corrientes colectivas para sus propios fines. Más adelante volveremos sobre este tema.

Si los efectos sinergéticos están realmente presentes en la formación de la opinión pública, sería desde luego muy extraño que los sociólogos no los hubieran percibido. Muy al contrario, en la bibliografía sociológica y en la historiografía social encontramos abundantes referencias a este tema. El concepto de «opinión pública« *(opinión publique)* fue empleado posiblemente por primera vez, por Jean-Jacques Rousseau (1712-1778), en el sen-

tido de que constituye una instancia de enjuiciamiento contra cuya reprobación conviene estar precavido. En el sentido de nuestra definición actual deberíamos hablar más bien de «opinión pública dominante».

La posibilidad de influir en las personas también queda claramente expresada en las siguientes palabras de James Madison (1751-1836), uno de los padres de la Constitución norteamericana: «Si bien es cierto que toda dominación, todo gobierno, están legitimados por la opinión pública y se basan en ella, no lo es menos que en cada individuo la fuerza de sus convicciones y opiniones y el grado en que sus opiniones influyen en su conducta *práctica,* en su actuación, dependen en gran medida de *cuántos* hombres cree que opinan igual que él. La razón humana, el hombre en general, es muy temeroso y prudente cuando se siente *solo,* y se vuelve más fuerte y confiado en la medida en que cree que *muchos otros* piensan igual que él.»

Elisabeth Noelle-Neumann expresa esta relación en los siguientes términos:

«Su naturaleza social lleva al hombre a temer la segregación y a desear ser respetado y querido entre los demás seres humanos.»

En otro lugar dice:

«Sólo el supuesto de un enorme temor al aislamiento permite explicar el formidable acierto con que los seres humanos, al menos colectivamente, logran identificar, con gran precisión y sin ningún recurso demoscópico, qué opiniones están en alza y cuáles en baja.»

«El esfuerzo de observar su entorno parece ser el mal menor, comparado con el peligro de perder repentinamente la simpatía de sus congéneres y quedarse aislado.»

Mucho antes, esta influencia mutua entre los hombres ya reconocida por Ch. A. H. C. Tocqueville (1805-1859), quien la formuló en los siguientes términos:

«En los pueblos democráticos, gozar del favor público parce ser tan importante como el aire que se respira, y no estar de acuerdo con la masa es como no vivir. Ésta no necesita aplicar las leyes para doblegar a los disidentes. Basta con la desaprobación. Muy pronto los vence la sensación de aislamiento e impotencia y les arrebata toda esperanza.»

La posibilidad de influir todavía no indica, evidentemente, nada en cuanto a la génesis de un estado de orden macroscópico, que aquí se traduciría en el predominio final de una opinión. Ello sólo puede demostrarse con los métodos matemáticos de la sinergética. La capacidad de influencia mutua tiene como resultado un efecto amplificador idéntico al que encontramos en la luz láser. Si en el láser dominaba determinada onda que llamábamos, no sin segundas intenciones, una moda, ésta triunfa finalmente de todas las demás en la lucha competitiva. Un número creciente de átomos va entrando en su esfera de influencia. Algo similar ocurre con la formación de la opinión pública dominante, la cual va fascinando a un número creciente de personas, que finalmente la defienden.

Tocqueville también reconoció claramente el principio de la esclavización que gobierna la sinergética. Destacó que los pueblos democráticos tuvieron que vencer ante todo las fuerzas «que obstaculizan o retrasan desmesuradamente el auge de la razón individual», abriendo así el paso a la libertad espiritual. Pero si ahora, «bajo el imperio de ciertas leyes —Tocqueville se refiere a la autoridad de la mayoría numérica—, se asfixiara la libertad espiritual..., el mal sólo habría cambiado de aspecto; los hombres no habrían encontrado el camino hacia una vida independiente; sólo habrían descubierto... una nueva forma de esclavitud».

James Bryce (1888) lo expresa aún más claramente en un artículo en el que habla de la tiranía de la mayoría.

No es extraño, pues, que el resultado final de estos procesos, lo que hemos denominado opinión pública *dominante*, sea identificado por los estudiosos de la demoscopia, en especial por Elisabeth Noelle-Neumann, con la *opinión pública* propiamente dicha. Así, Noelle-Neumann define la opinión pública como «aquellas opiniones que, dentro de un margen de controversias, se pueden expresar sin quedar aislado». En términos sinergéticos, la opinión pública dominante y la individual se condicionan y se estabilizan mutuamente.

Cambios de opinión: ¿cómo y por qué?

¿Cómo puede producirse entonces un cambio de opinión? También aquí es útil establecer una analogía con los fenómenos de las ciencias naturales. Como hemos visto, en los líquidos se forman «rollos» al elevar la

diferencia de temperaturas. Traducido al terreno sociológico, esto significa: los cambios ambientales, como cambios en la situación económica, la preponderancia de una presión política interior, etc., pueden minar la confianza en una opinión sustentada hasta entonces; en otras palabras, el sistema se desestabiliza. Esto incluye también las acciones terroristas, que son el intento de debilitar y socavar la confianza en un modelo de sociedad, en la justicia, etc., a fin de preparar un cambio en la opinión pública. Precisamente en las épocas de transformaciones radicales parece muy importante para el individuo la observación del comportamiento de los demás, para evitar quedar aislado cuando varíen las circunstancias. En el sentido de la sinergética, los cambios de opinión vienen preparados por hechos externos. Pero una vez producida la desestabilización, entre las personas se difunde el parecer de que debe ocurrir algo nuevo.

Sin embargo, a menudo no está nada claro en qué dirección se debe continuar. Y ésta dependerá siempre de unos pocos, que trazarán la nueva senda. Un grupo aislado, una vanguardia o unos revolucionarios activos, a veces incluso un solo hombre, pueden convertirse entonces en núcleo de cristalización de un nuevo camino a seguir. Lo decisivo son, una vez más, las fluctuaciones. En una situación de inestabilidad, unos acontecimientos imprevisibles y aparentemente locales adquieren un enorme poder de irradiación, una fuerza que jamás habrían cobrado en tiempos normales, en los que la acción de esos grupos aislados no habría pasado de constituir un episodio rápidamente olvidado, una pequeña fluctuación pasajera.

Medios de comunicación de masas: «ordenadores» presionados por la selección

Hasta aquí hemos procedido como si la aparición del «ordenador», esto es, de la «opinión pública dominante», y la opinión del ciudadano individual constituyeran un circuito cerrado, a semejanza de los átomos del láser que generan la luz láser y son esclavizados por ésta. Aunque esta idea fundamental es absolutamente correcta, sin embargo requiere un importante complemento. En efecto, la opinión pública no surge únicamente por contacto directo entre los hombres, sino también a través de los medios de comunicación. Y sería ingenuo considerar, como lo hacen equivocadamente muchas personas, que los medios de comunicación de masas no son más

que una reproducción de la opinión pública. Muy al contrario, éstos poseen una dinámica propia, a su vez íntimamente relacionada con los problemas fundamentales de la sinergética.

El escritor francés Guy de Maupassant (1850-1893) no sólo describió atrevidas aventuras amorosas en sus novelas, sino que a la vez fue un agudo y crítico observador de su época. En su novela *Bel ami*, Maupassant, que había sido periodista, describe a un editor que por la noche tasa las noticias llegadas durante el día según su valor, como si fueran mercancías. Aquí se nos presentan con un nuevo ropaje una serie de principios que ya hemos visto mucho ante en este libro. Por una parte, está el problema de las posibilidades limitadas. Un periódico no puede publicarlo todo. No debe superar determinado volumen, para no encarecerse demasiado. Además, el lector dispone de un tiempo limitado: unos quince minutos diarios, según han descubierto los sociólogos. Por lo tanto, los periodistas deben hacer una selección entre la abundancia de material. Pero, ¿según qué criterios? Existe, ciertamente, una amplia gama de puntos de vista. Pero aquí escogeremos aquellos que parecen más convincentes desde la perspectiva de la sinergética.

Los periódicos, diarios y revistas sólo pueden existir si la gente los compra; en otros términos, sus compradores constituyen su medio de sustento. Pero éste también tiene sus límites. Acaba desembocándose forzosamente en una lucha competitiva y, con ella, en un proceso de selección. La competencia, por un lado, y razones de espacio, por otro, obligan, por tanto, a los periódicos y revistas a efectuar una preselección que garantice lo mejor posible su propia subsistencia. En este sentido, estas publicaciones adquieren un doble papel, una de cuyas vertientes es la siguiente: ellas mismas reaparecen como «ordenadores», en la medida en que las opiniones que expresan son capaces de influir en las de sus lectores. Esta influencia a veces se siente como opresiva y opresora. Elisabeth Noelle-Neumann escribe a este respecto:

«Los medios de comunicación de masas encarnan a la opinión pública, una opinión pública muy extendida, anónima, inexpugnable e impermeable a toda influencia.» Y también:

«Los medios de comunicación de masas representan una comunicación unilateral, indirecta, pública, el polo opuesto de la comunicación humana

más natural: la conversación. Éste es el origen de la sensación de impotencia del individuo frente a los medios de comunicación; los medios de comunicación de masas se sitúan en los primeros lugares en todas las encuestas acerca de quién tiene demasiado poder en la sociedad actual.»

La impotencia del individuo se manifiesta de dos maneras. Se le escatima la escena pública; en otras palabras, no logra comunicar su opinión a los demás a través de los medios de comunicación, y puede ser puesto en la picota sin posibilidad de defenderse adecuadamente. Un periódico o una revista también pueden verse favorecidos por un proceso en su contra; el cual les da publicidad y hace aumentar sus ventas, incluso si finalmente lo pierden. El otro aspecto del citado doble papel de los periódicos y revistas se manifiesta en el hecho de que, si bien es completamente cierto que el individuo se halla a la merced de los medios masivos, éstos a su vez son vulnerables, incluso mortalmente, al comportamiento colectivo de los lectores. No puedo imaginarme un periódico capaz de subsistir mucho tiempo sin ayuda económica externa si defiende constantemente una opinión contraria a la de sus lectores. No obstante, es preciso hacer una salvedad: los periódicos y las revistas no publican exclusivamente noticias políticas (y la sección política no tiene por qué ser el objetivo principal de la publicación). Precisamente para protegerse contra las reacciones (y los caprichos) del público, por lo común las publicaciones periódicas siguen la vía de la generalización. Ofrecen un abanico relativamente amplio de temas, que abarca desde la política y la economía hasta el arte. La prensa logra una estabilización adicional gracias a las noticias locales, que suelen ser informaciones de poca monta, como los horarios de recogida de basuras o el programa de reuniones y festejos municipales. Aunque es cierto que estas noticias locales no son patrimonio de un solo periódico, de modo que no excluyen la lucha competitiva. En muchos pueblos podemos observar que de hecho sólo queda un periódico, o en las zonas urbanizadas que rodean a poblaciones más importantes, el programa de noticias suprarregionales es suministrado por la redacción central de un periódico principal al cual las diversas publicaciones regionales sólo adjuntan las páginas locales.

Es indudable que en este caso ya no existe una competencia de opiniones entre distintos periódicos, sino que el periódico principal ha logrado un monopolio de opinión. También es muy difícil que el comportamiento colectivo de los lectores desbarate económicamente este monopolio, puesto

que éstos no pueden, o no quieren, renunciar a las noticias locales. Y es perfectamente posible que en el curso de la evolución de los respectivos periódicos las tendencias preferenciales inicialmente poco destacadas se hayan ido fortaleciendo gracias al mecanismo de realimentación que tantas veces comentamos en este libro. Pienso que para los sociólogos sería interesante estudiar si las diferencias políticas norte/sur en la República Federal de Alemania no podrían estar relacionadas con mecanismos de este tipo.

¿Cómo puede eludir el ciudadano individual esta esclavización que casi parece inevitable? Si pensamos en nuestra propia sumisión a las influencias, la única forma de huir de ellas es hacer que las influencias exteriores se compensen mutuamente, como si dijéramos, del mismo modo que podemos mantenernos erguidos en medio del gentío que nos empuja, precisamente porque nos empuja y aprieta por todos lados. Eso sólo puede lograrse leyendo también periódicos suprarregionales y, en la medida de lo posible, periódicos extranjeros de distintas tendencias. Lo cual, por supuesto, no significa que debamos abonarnos a veinte periódicos; basta con leer de vez en cuando algún periódico diferente. A muchos les sucederá entonces lo que me pasaba en mis viajes al extranjero: los problemas de Alemania se me aparecían bajo una luz y con unas conexiones totalmente distintas y novedosas.

Los diarios, y especialmente las revistas, no sólo adoptan el mencionado camino de la generalización, sino también el de la especialización, en virtud de la cual se dirigen, por ejemplo, a determinados grupos de lectores. Hay periódicos de contenido elevado, cuya lectura constituye un verdadero placer intelectual, mientras que otros intentan ganarse a sus lectores mediante una reducción de las pretensiones intelectuales.

Hasta cierto punto también el precio decide, además del contenido, que un periódico sea leído, o no. Nuevamente operan aquí unos mecanismos cuyo resultado final es que prevalezca un solo periódico. En efecto un periódico de mayor circulación podrá abaratarse por motivos económicos fáciles de comprender. Su precio más bajo lleva a que éste se compre más, proceso que puede desembocar en la supervivencia exclusiva de ese único periódico en la lucha competitiva. Aun cuando coincidamos con la tendencia política del periódico que ha salido triunfante en la lucha competitiva, automáticamente nos veremos sometidos a un monopolio de las opiniones.

Incluso si quisiéramos perseverar en nuestras opiniones (lo cual no es forzosamente una señal de inteligencia, del mismo modo que un cambio de opinión no tiene por qué significar falta de carácter), con el tiempo el propio periódico puede experimentar un cambio en sus puntos de vista, y podría darse el caso de que sus opiniones nos esclavizaran sin que lo percibiéramos.

Debemos tener presente que la formación de una opinión o de un periódico dominante suele tardar años, de manera que al final ya ni siquiera recordamos cómo se originaron esas opiniones preferentes o, dicho de modo más crudo, esos monopolios de opinión. Lo mismo rige para los sistemas políticos, que no son sino una manifestación concreta de la opinión pública, esto es, la opinión pública expresada en una forma de Estado. En casos extremos, pero lamentablemente muy reales, todos juntos vamos adentrándonos imperceptiblemente en el fango paso a paso, como un desfile de personas cogidas del brazo; hasta hundirnos. Si un individuo aislado quiere huir, sus vecinos reaccionan forzándolo a continuar, y al final se habrán hundido todos. Sin duda la cuestión de la culpabilidad colectiva adquiere así una significación totalmente distinta. En realidad, nadie quería la «solución final»[2] tal como se dio, y sin embargo se deslizaron todos juntos hasta ella. Más adelante retomaremos esta cuestión cuando hablemos de las dictaduras.

La reducción del mundo

Volvamos al tema de la formación de opiniones, entendidas como «ordenadores». Como hemos visto antes, en la esfera de las ciencias naturales los ordenadores se presentan muy plásticamente y podemos describirlos en pocas palabras, tales como la «onda láser dominante» o la «estructura de panal de abejas». Gracias a los procesos de amplificación la naturaleza logra mantener al final unos estados de orden muy pronunciado, gracias a la competencia y la selección entre distintos estados de orden posibles. Para descubrir los motivos de un comportamiento similar en la formación de

[2] Propugnada por el régimen hitleriano *(N. del T.)*.

estructuras perfectamente ordenadas en la esfera espiritual podemos remitirnos a las investigaciones del periodista estadounidense Walter Lippmann. Dos factores favorecen ante todo la aparición de «ordenadores», es decir, de maneras unitarias de pensar. Por una parte, los recursos limitados, esto es, el número limitado de informaciones o tendencias que pueden llegar a comunicarse. Esto lleva aparejada necesariamente una fuerte reducción de la complejidad del mundo real, que queda transformado en una ficción, como dijo claramente Niklas Luhmann. Walter Lippmann lo expresa en estos términos:

«Cuando llega a manos del lector, todo periódico es el resultado de una serie de selecciones.» Y señala que con ello se crea un entorno adecuado para el lector, un mundo ficticio, podríamos decir; o, en términos aún más tajantes, aquello sobre lo cual no se informa, no existe.

De este modo se configura una imagen simplificada de la realidad, que sin embargo nos parece la realidad misma. Y esta es una de las razones que favorece la presencia de «ordenadores»: la obligatoriedad natural de la selección. La otra es que, en la esfera espiritual, los temas seleccionados pueden captarse con la misma concisión con que lo hacen los «ordenadores» en las ciencias naturales. Ello ocurre a través de frases hechas o, para usar el término del ya mencionado Walter Lippmann, a través de *estereotipos*. En las imprentas, la estereotipia es una sección en la que se obtiene una plancha rígida por vaciado de la plancha de texto hecha con caracteres movibles; esta plancha rígida, el estereotipo, permite obtener un número discrecional de reproducciones. Los estereotipos son, por tanto, frases hechas creadas con la intención de caracterizar determinadas cosas. A menudo llevan simultáneamente implícita una determinada opinión, como en el caso de la expresión «prohibición de ejercer la profesión».[3] El estereotipo se convierte en una moneda de uso corriente, que se emplea una y otra vez y mediante la cual termina por imponerse determinada opinión contra la de la competencia. En palabras de Walter Lippman: «quien se apropie de los símbolos que dominan los sentimientos públicos en determinado momento, dominará en gran medida el camino hacia la política».

[3] *«Berufsverbote»:* En la antigua RFA, prohibición del ejercicio de profesiones públicas, en la enseñanza por ejemplo, a personas de determinadas ideologías, especialmente comunistas.

La competencia entre «ordenadores», que encontramos repetidamente en las ciencias naturales, no ha escapado a la atención de los científicos en la esfera sociológica. Como ejemplo bastará citar a Elisabeth Noelle-Neumann:

«La atención (del público) es escasa; es preciso imponer personajes o temas frente a una fuerte competencia. Los medios de comunicación de masas crean pseudo-crisis y pseudo-novedades para rechazar la competencia de otros temas.»

Los métodos de la sinergética nos permiten reconocer las normas generales en que se basan todos estos procesos. La formación de opiniones y las publicaciones están sometidas a normas generales cuya consecuencia forzosa es una enorme reducción de la multiplicidad de opiniones diversas a una sola o a unas pocas. Pero precisamente el conocimiento de estas leyes puede permitirnos actuar en su contra, como ya señalábamos en páginas anteriores.

En el caso que nos ocupa se añade sin embargo un aspecto que no tiene correspondencia en el dominio físico-químico, aunque sí en el ámbito de la naturaleza viviente. Éste es el carácter evolutivo. Ante nosotros se extiende un mundo en constante transformación, en el que nacen unas ideas y otras mueren. Es un acontecer extremadamente dinámico, que también se refleja en la prensa. Bastará señalar aquí algunos aspectos desde un punto de vista sociológico.

La prensa recoge nuevos temas para poner en marcha un proceso de formación de las opiniones públicas. Para ello debe encontrar, como dice Niklas Luhmann, palabras y fórmulas. Finalmente, cierto tema resulta apto para el debate, con la intervención decisiva en muchos casos de procesos sinergéticos, tal como aquí los hemos definido. Dicho tema se retoma desde los más diversos puntos de vista o en los más diversos periódicos, hasta que se produce una saturación por parte del público. Todo está dicho y repetido; en la jerga periodística, el tema está gastado. Pero aquí interviene una interesante comprobación de unos comunicólogos norteamericanos, quienes investigaron si las opiniones de la población precedían en el tiempo a los centros de interés temático de los medios de comunicación de masas o si ocurría a la inversa. Estos investigadores constataron que por regla general, los temas centrales de los medios de comunicación precedían a la evolución efectiva de las opiniones de la población.

Nuestro interés hasta aquí ha sido exponer algunas ideas fundamentales sobre la influencia mutua. En particular, hemos constatado que los medios de comunicación tampoco son dictadores absolutistas, ni mucho menos, sino que tienen sus propios problemas de supervivencia. Existe un proceso continuo de evolución, que se manifiesta claramente en la creación de nuevas revistas y editoriales, por un lado, y en su fusión y desaparición, por otro.

La televisión, un medio con inmenso poder de irradiación

Pero de lo dicho se desprende directamente que en la televisión actúan otros mecanismos. Esto es especialmente cierto en el caso de la televisión estatal, en la cual la actitud de los consumidores no tiene una repercusión directa sobre la existencia económica o la mera supervivencia del medio. Por otra parte, también la televisión está sometida a los condicionamientos de la limitación de los recursos, esto es, la existencia de un tiempo de emisión finito. En general, no es posible, por ejemplo, presentar íntegros los discursos de todos los políticos. La reducción imprescindible, es decir, la elección de ciertos fragmentos de los discursos, obliga a efectuar necesariamente una preselección, la cual puede fomentar la formación de una opinión preferente; queda en el aire si el correspondiente redactor televisivo actúa de forma deliberada o no. Si tenemos en cuenta que el espectador es influenciable, ello da lugar a una serie de interrogantes muy interesantes desde el punto de vista sinergético; tantas, que requerirán un sondeo previo. Supongamos, por ejemplo, que las opiniones emitidas aparezcan con la misma frecuencia que su distribución en el seno de la población; según las leyes fundamentales de la sinergética cabría esperar entonces que a la larga, se fuera fortaleciendo e imponiendo cada vez más una sola opinión hasta obliterar todas las demás, siempre que no entrara en flagrante contradicción con el medio circundante. En cambio, si todas las opiniones —de cualquier tendencia— están representadas por igual, el cuadro también se distorsionará. Los grupos marginales obtendrán un peso excesivo y muchos de ellos lograrán un apoyo que puede no ser deseable.

Es posible que la salida a este dilema esté en soportar durante un tiempo el predominio de una opinión y su posterior desplazamiento por otra; en

cuyo caso, la libertad de opinión obligará a velar por que la opinión no quede congelada.

Gobierno y opinión pública

La sinergética nos enseña que el «ordenador» tiene dos caras o una doble función. Por una parte, esclaviza a los subsistemas y, por otra, es mantenido por éstos. Como hemos visto, el ordenador «opinión pública» está supeditado a este principio, pero cumple además otra función, que tardó en descubrirse. En efecto, la opinión pública no sólo influye en la opinión popular, sino también sobre el gobierno. Al respecto citaremos unas reflexiones de David Hume, nacido en 1711:

«A quienes se ocupan de la filosofía política nada les parece más sorprendente que la facilidad con que los *muchos* son gobernados por los *pocos,* y la complacencia con que los hombres subordinan sus propios sentimientos y deseos a los sentimientos y deseos del gobierno. Cuando intentamos analizar de qué manera se produce semejante milagro, descubrimos que los gobernantes... no se pueden apoyar sino en la opinión, la aprobación. El gobierno se funda únicamente en la opinión; y esto vale tanto para los gobiernos más despóticos y militares como para los más libres y populares.»

Podemos resumir estos pensamientos con la siguiente frase de David Hume: *«It is on opinión that government is founded»,* en la opinión se fundamenta el gobierno. En los Estados democráticos, la forma más evidente de influencia de la opinión pública sobre el gobierno son las elecciones.

Y en ellas aparece un fenómeno extraño, que parece contradecir lo que decíamos antes. En numerosos Estados se llega cada vez más frecuentemente a una suerte de empate. Se depositan aproximadamente el mismo número de votos a favor del gobierno, o de la respectiva coalición, y de la oposición. Es interesante rastrear las causas de este fenómeno, que ya hemos encontrado antes en la sinergética, cuando observábamos que puede haber distintas respuestas para una misma pregunta o, dicho de modo más claro, soluciones diferentes para un mismo problema.

El comportamiento de los partidos recuerda a menudo el de los vendedores de helados, que examinábamos en nuestro capítulo sobre economía.

Los partidos están sometidos a la lucha competitiva; en algún caso puede estar en juego la propia supervivencia de un partido, mientras que en otro la cuestión clave es si obtiene o conserva el gobierno. Tendemos a creer que cada partido tiene sus ideales y los quiere implantar en favor de sus votantes. Pero pronto se percata de que para poder lograr sus propósitos necesita acceder al poder, para lo cual precisa un número suficiente de votos. Por ello tendrá que ajustar su estrategia electoral a fin de captar a los simpatizantes de otros partidos. Un comportamiento equivalente al de los vendedores de helados que van acercándose mutuamente, hasta que al final se hallan en una posición en la que, al menos vistas desde fuera, las diferencias iniciales se han difuminado (por lo menos antes de la compra del helado). El profano sólo podrá percibir la diferencia después de haber tenido que comer el mismo helado durante cuatro años. Esta igualación exterior, que ya se manifiesta en el hecho de que los partidos suelen emplear consignas idénticas, como paz, libertad y justicia, permite reconocer que precisamente en un entorno complejo resulta difícil encontrar criterios de decisión. A esto se añade que a veces existen soluciones objetivamente equivalentes, aunque completamente distintas, para determinados problemas económicos o sociales. En estos casos un grupo sale siempre muy perjudicado, mientras que el otro se beneficia y viceversa.

Por todos estos motivos y seguramente por muchos más, el «esfuerzo sinergético» o curva sinergética con que nos hemos encontrado repetidas veces tendrá varias posiciones locales preferentes. Un grupo considera que cierta posición es la mejor; un segundo grupo se inclina por otra posición. Obtenemos así una situación simétrica, como la que hemos encontrado ya tantas veces. Y ya sabemos qué ocurre en esos casos: unas fluctuaciones mínimas, que en el caso de la política serán unos grupos o partidos muy pequeños, inclinarán la balanza hacia uno u otro lado, rompiendo la simetría. Si siempre triunfa la misma configuración, podrá producirse ciertamente un creciente estrechamiento de las opiniones. El rasgo característico de una democracia debe de ser el hecho de que, al menos en principio, ofrece la posibilidad de la alternancia en el poder. En este sentido, las democracias contienen una simetría mucho mayor que las dictaduras; la mayor simetría significa un espectro mucho más amplio de opiniones y posibilidades de desarrollo individual; en otros términos, la democracia permite garantizar una sociedad pluralista. Ello implica al mismo tiempo la mayor

capacidad de adaptación de una democracia a cambios ambientales, tales como ciertos acontecimientos económicos. En cierto modo la democracia contiene de forma latente la capacidad de reaccionar ante cualquier circunstancia, y sólo es necesario fortalecerla adecuadamente para hacer frente a una situación nueva.

El hecho de que tampoco aquí se pueda alcanzar en todos los casos un *estado de equilibrio* ya quedó claro en nuestras consideraciones sobre los procesos económicos.

En general, una democracia debe caracterizarse por un orden en lo fundamental, pero cuya estructuración y autogobierno quedan en manos del individuo o de las agrupaciones individuales. No se trata de implantar el orden, la paz de los cementerios, sino el orden en un sentido más elevado, que garantiza la libertad de cada uno de los ciudadanos y la consiguiente diversidad de opiniones.

En este capítulo hemos centrado nuestra atención en el fenómeno de la opinión pública. Hemos investigado cómo se forma y cómo influye sobre el individuo y sobre los gobiernos.

Estudiemos ahora hasta qué punto podemos hablar de una opinión publica en las dictaduras.

Dictaduras

Las personas que hayan vivido bajo un régimen dictatorial saben que en éste se crea una suerte de doble clima de opinión. Un fenómeno que, por otra parte, también se puede observar en un Estado democrático como la República Federal de Alemania, donde lo ha estudiado y descrito Elisabeth Noelle-Neumann.

En una dictadura, el «doble clima de opinión» significa lo siguiente. Los órganos de prensa controlados por el gobierno expresan opiniones completamente unitarias y uniformes, respaldadas por noticias convenientemente seleccionadas. Al mismo tiempo persiste evidentemente una opinión privada y, no obstante, en cierto sentido homogénea, por lo cual debe considerársela pública. Esta posición, muy divergente de la opinión oficial, se manifiesta a través de los rumores y, sobre todo, de los chistes políticos. Las medidas adoptadas por los gobiernos totalitarios contra la difusión de

estas opiniones no oficiales y sin embargo valorables como públicas, muestran claramente que los contactos directos entre las personas pueden originar un clima de opinión peligroso para el gobierno o la clase gobernante. Tales medidas abarcan no sólo la prohibición de escuchar emisoras de radio extranjeras o la interferencia de sus emisiones, sino también las restricciones en el uso de sistemas de multicopista, como los procedimientos Xerox, y el control riguroso de las labores desarrolladas por las imprentas. Lo cual parece sugerir que sólo puede resultar peligrosa la opinión multirreproducida. Pero también sabemos que en esos regímenes la policía secreta y la red de delatores siembran el temor generalizado a expresarse pública y críticamente en contra del gobierno. De este modo el amedrentamiento impide cualquier manifestación de las opiniones individuales. Con todo, no siempre se pude suprimir el estallido de conductas colectivas. Por esto los dictadores crean válvulas de escape para la ira popular, a menudo en forma de persecución de las minorías raciales, religiosas o de disidentes que se apartan de la norma.

A través de su estudio de los efectos colectivos, la sinergética también logra explicar por qué las dictaduras son tan estables, a pesar de que esa estabilidad resulte incomprensible para la mayoría de los ciudadanos de un país democrático. La respuesta se halla en el efecto autoestabilizador de un gran sistema. Para que el estado de orden se derrumbase, todos los ciudadanos, o una gran parte de ellos, tendrían que abandonar el orden dictatorial *al mismo tiempo.* Pero dado que las dictaduras restringen y controlan tan severamente las posibilidades de comunicación entre los ciudadanos, éstos sólo pueden emprender intentos de rebelión individual, que están condenados al fracaso, porque en ese preciso momento los demás miembros de la sociedad se aferran al viejo sistema o tienden hacia direcciones completamente distintas, con lo cual se cierran el camino unos a otros. Las condiciones previas para un cambio de régimen (una revolución) son, por consiguiente, una suavización de las medidas gubernamentales que facilite un intercambio de opiniones o la construcción de una red clandestina. Sin embargo, los dictadores eficaces también toman medidas contra una red de esa índole, por ejemplo a través de agentes provocadores que se infiltran como miembros activos en un grupo clandestino, pero finalmente delatan a los militantes.

Pese a todo, en un régimen dictatorial puede darse una manifestación pública de las opiniones, aunque por su forma tal manifestación parezca totalmente anodina. En cierta ocasión, me llamó la atención un fenómeno interesante ocurrido en un avión de un país sometido a una dictadura. La azafata, como es costumbre, repartía los periódicos. Los pasajeros los aceptaban, pero pasaban a leer de inmediato la última página. Al principio creí que allí debía aparecer una noticia de palpitante actualidad, hasta que comprobé que todos estaban leyendo la página de deportes. Es difícil imaginar un rechazo más claro, pero a la vez inatacable, del régimen.

La opinión pública y las minorías

Una y otra vez hemos visto que las normas sinergéticas originan una presión selectiva en los más diversos ámbitos de la naturaleza, pero también en los de la sociedad. Esta presión provoca una creciente unión de diversos grupos; por ejemplo, grupos de opinión. Esta tendencia puede llegar hasta la proscripción o persecución de los disidentes, sobre todo si se trata de grupos que se distinguen de la masa desde un principio por sus rasgos exteriores (por ejemplo, raciales o religiosos). Tales grupos no siempre gozan de la protección del Estado en todos los países. Para sobrevivir, algunos reaccionan asimilándose, comportándose en lo posible de manera que no se los pueda distinguir de los demás. Pero también hay un segundo camino: intentar sobresalir. En ese caso los propios grupos minoritarios se estimulan para obtener logros cada vez más destacados; consiguen así el reconocimiento general y aseguran su subsistencia en virtud de un rendimiento superior.

También diferirá del resto de la población el comportamiento social de un grupo de esta índole. A causa del problema de la supervivencia, sus integrantes tienen que ayudarse mutuamente. Sólo a través de la cooperación podrá mantenerse fuerte el grupo. El comportamiento del resto de la población suele ser diferente. Cada cual ve en el otro un competidor manifiesto. A ellos se aplican las palabras de Rousseau, en una obra premiada que lo hizo famoso en 1755. Se titulaba *Acerca del origen de la desigualdad entre las personas.* Rousseau constata: «Explicaré hasta qué punto este todopoderoso afán de celebridad, gloria y distinciones que nos consume a todos, nos lleva a ejercitar nuestros talentos y virtudes, y se puede medir, en qué

grado excita y multiplica las pasiones y convierte a todos los hombres en competidores, en rivales, o más bien, en enemigos.»

Revoluciones

Las revoluciones siempre afectan profundamente la vida de todos los ciudadanos. En el sentido de la sinergética, lo que cambia drásticamente es el estado macroscópico, es decir, la forma de gobierno. A lo largo de este libro ya hemos hablado reiteradamente de estos cambios violentos en el caso de fenómenos físicos, químicos o biológicos, los cuales presentan unas analogías muy evidentes. Esto nos permite abrigar la esperanza de que los métodos de la sinergética puedan ayudar a comprender también las revoluciones en las esferas política o sociológica. En este sentido las revoluciones se presentan como transiciones de fase, igual que, por ejemplo, el paso del estado no magnético al magnético en un imán de hierro, o de la luz no ordenada de una lámpara a la luz ordenada del láser. Sin embargo, debemos guardamos de establecer prematuramente un paralelismo demasiado estrecho con respecto a lo que significa un estado ordenado en el terreno sociológico, por ejemplo. Suscitaríamos muy pronto un justificado desacuerdo. Por esto emplearemos el concepto de «estado ordenado» en un sentido muy laxo; con él sólo caracterizaremos las distintas formas de gobierno; cada forma de gobierno corresponderá a una fase determinada.

En la naturaleza inanimada, por ejemplo en las fases sólida y líquida del agua, las relaciones entre las moléculas están reguladas de una forma determinada; por otra parte, estas mismas relaciones determinan el estado macroscópico, agua o hielo. De modo similar, los comportamientos de los miembros de una comunidad humana varían según las formas de gobierno. Y al igual que en el mundo inanimado se producen transiciones entre distintos estados de orden, como el paso de sólido a líquido, también las revoluciones se nos presentan con distintos ropajes. Puede haber revoluciones que lleven de la monarquía a la democracia, como en el caso de la Revolución Francesa. En la toma del poder por parte de Hitler vemos el paso de la democracia a la dictadura. En la transición del régimen de los zares al de Stalin se evidencia la transformación de una dictadura en otra. El paso de una dictadura a una democracia parece ser un fenómeno poco frecuente en nuestros días, a diferencia del paso de una dictadura a otra. En esta lista

falta evidentemente la transición de una democracia a otra. De hecho es precisamente la peculiaridad de una democracia el conservar su carácter fundamental aunque el gobierno pase a manos de otro partido.

¿Cuáles son los mecanismos decisivos para una revolución? Actualmente estamos sin duda en condiciones de captarlos sinergética- mente a través de modelos matemáticos, tanto como de documentarlos con las observaciones de los historiadores. Una revolución parece ir precedida siempre de una desestabilización: es decir, que las amplias masas de ciudadanos ya no están dispuestas, o están poco dispuestas, a defender el sistema imperante. A esto se añade el factor, sin duda decisivo, de la influencia recibida y ejercida mutuamente por ambos bandos. De esta manera, la actitud negativa frente al sistema imperante va creciendo en forma de alud, hecho que también se puede demostrar matemáticamente. Este crecimiento torrencial también se ve favorecido porque los partidarios del sistema imperante se aíslan cada vez más y callan, con lo cual lo privan, intencionadamente o no, de su apoyo. Elisabeth Noelle-Neumann caracteriza acertadamente este estado de cosas con el concepto, acuñado por ella, de espiral del silencio. Es un fenómeno ya observado y descrito en el pasado. Sólo citaremos la historia de la Revolución Francesa de Alexis de Tocqueville, publicada en 1856. Al describir el retroceso de la Iglesia francesa a mediados del siglo XVIII, Tocqueville señala que «las personas que perseveraban en la antigua fe temían ser las únicas que le eran fieles, y como temían más la segregación que el error, se unían a la multitud aún sin pensar como ésta. La que (todavía) no era más que la opinión de una parte de la nación parecía ser así la opinión de todos, y precisamente por eso sojuzgaba irremisiblemente a quienes le daban esa apariencia engañosa.»

Se trata, pues, de un efecto de refuerzo, que ciertamente es aún mucho más marcado si la mayoría de los partidarios del sistema ya se ha apartado de él *motu proprio*.

Pero ¿cuáles son las causas de una desestabilización de esta naturaleza? Pueden ser la miseria económica provocada por una larga guerra, la falta de libertad espiritual, el elevado nivel de desempleo y una agobiante presión tributaria (por ejemplo, durante las guerras campesinas), factores que forman parte de una visión del futuro que actualmente ya no peca de poco realista. Como señalábamos antes, paralelamente existen los intentos de desestabilización de un régimen por parte de pequeños grupos dedicados a

crear una falta de seguridad ciudadana mediante actos terroristas. También en este caso puede llegarse a una espiral, si la justicia comienza a carecer de garantías porque el Estado ya no apoya las decisiones de los funcionarios y, en consecuencia, la persecución del delito resulta cada vez menos convincente.

La teoría de las transiciones de fase permite identificar en el mecanismo de las revoluciones muchos de los efectos constatados en las ciencias naturales. Como sabemos, la desestabilización del estado anterior observable en las transiciones de fase está asociada a intensos fenómenos de fluctuación. En el caso de la evaporación del agua, por ejemplo, se trataba de fluctuaciones de densidad. Ahora, en el terreno sociológico, aparece una acumulación de fenómenos inusitados, que en condiciones normales son muy poco frecuentes y cuyo efecto sobre los regímenes es, además, efímero. En el terreno político estos fenómenos pueden ser un rápido incremento en el número de atentados terroristas, las riñas callejeras masivas entre grupos políticos enfrentados, las huelgas salvajes con consecuencias devastadoras para la economía nacional, las manifestaciones y reuniones públicas prohibidas por las leyes del sistema en cuestión. Estas manifestaciones son la expresión de un ordenamiento político que está desquiciándose; a menudo —y así lo demuestran también precisamente los modelos matemáticos— el camino que conduce hacia el nuevo orden, el nuevo sistema de gobierno, no está prefijado ni mucho menos. Un ejemplo de la historia reciente es la caída del *shah* del Irán: tras su abdicación forzada comenzaron a competir varias tendencias distintas. Desde la perspectiva de la sinergética, en estos casos un grupo aislado, pero muy activo, puede ser decisivo para determinar la dirección en que se obligará a avanzar al conjunto de la población. En el sentido de la sinergética, una revolución es casi siempre una inestabilidad que rompe las simetrías. Sobre todo en las manifestaciones de masas se puede observar que los asistentes van enfervorizándose mutuamente y que su voluntad revolucionaria es un producto colectivo. La multitud adquiere un estado de excitación colectiva, que crea en las personas una impetuosa e irresistible sed de acción, de violencia, la cual puede manifestarse en forma de quema de automóviles, rotura de escaparates o, como en la Revolución Francesa, con la toma de la Bastilla. En estos estados de excitación colectiva el pensamiento lógico individual parece quedar descartado

casi por completo. El individuo aparece esclavizado por un «ordenador», en este caso la consigna, surgida a menudo por casualidad.

Y con esto volvemos a la pregunta inicial de si las revoluciones pueden predecirse o incluso calcularse previamente. Actualmente, los servicios de estudio de la opinión pública ya parecen estar en condiciones de averiguar, dentro de ciertos límites, cuándo existe una discrepancia demasiado grande entre las distintas opiniones de la población, cuál es la verdadera situación y cuál sería la situación deseable. No parece imposible que la aplicación de los métodos de la sinergética, junto con la sofisticación de los métodos de estudio de la opinión pública, permitan pronosticar en el futuro el estallido de una revolución.

Sin embargo, es preciso establecer algunas restricciones de principio, y ésta es precisamente una de las conclusiones decisivas alcanzadas. Los ejemplos de la sinergética nos han mostrado repetidamente que muchas veces resulta imposible predecir unívocamente el desarrollo ulterior de un sistema en sus puntos de inestabilidad. Fluctuaciones muy pequeñas pueden inclinar la balanza hacia uno u otro lado. En tales casos sólo pueden hacerse predicciones en términos de probabilidades. Por lo demás, dada precisamente la aparición forzosa de fluctuaciones desencadenantes, parece muy difícil pronosticar con exactitud el momento en que se producirá una revolución o sublevación popular.

Estos conocimientos evidentemente también son importantes para las personas que quieran provocar revoluciones y ambicionen la instauración de una dictadura, y no cabe duda de que esta metodología también es empleada por las grandes potencias para sus injerencias en los asuntos de otros países. 1) Tiene que desestabilizarse, el sistema político imperante, sea una democracia o una dictadura; 2) debe existir un grupo decidido de revolucionarios dispuestos a empujar a la población del Estado desestabilizado en una nueva dirección.

Seguramente la mayoría de los lectores coincidirá, a partir de sus propias reflexiones y observaciones, con las ideas que acabo de exponer. En cambio parece herético señalar otra consecuencia que puede deducirse de los modelos matemáticos. En efecto, éstos revelan nítidamente que la aparición de determinadas fases macroscópicas (y evito adrede el empleo del término «estado ordenado») no es sólo una propiedad del sistema en sen-

tido macroscópico, sino que las propiedades de sus componentes individuales pueden ser decisivas. Es imposible construir un láser que emita luz verde proveniente de átomos que sin actividad láser emiten únicamente luz roja. De modo análogo hay que preguntarse si la aparición de determinadas formas de gobierno no se ve cuanto menos favorecida en unos casos y dificultada en otros por los rasgos específicos del carácter nacional. Aquí parece abrirse un amplio campo de investigación sociológica y sociopsicológica.

¿Se pueden indicar principios generales para la acción?

De los más diversos ejemplos de las ciencias naturales y la sociología, así como de su tratamiento matemático, se pueden sacar algunas conclusiones generales, en parte desalentadoras. Algunas de las más importantes son las siguientes: la mera actuación colectiva, en la que cada cual hace lo mismo que el otro, *porque* el otro lo hace, puede originar a menudo estados macroscópicos de muy distinta naturaleza; en política se tratará de distintas formas de gobierno o modos de actuar, entre los que no se pueden excluir ni siquiera los crímenes colectivos. Al igual que cualquier otra forma de asesinato, el genocidio puede formar parte del ritual político-estatal.

Un segundo aspecto a añadir es el hecho de que, en las decisiones económicas y políticas, las soluciones frecuentemente no son de ninguna manera únicas ni unívocas, sino que se presentan varias soluciones equivalentes. En estos casos, encontrar una solución no significa hallar un nuevo estado óptimo. Todas las soluciones tendrán ventajas e inconvenientes, y estarán estrechamente vinculadas a los diversos y entrelazados comportamientos colectivos. Cuando uno actúa de determinada manera, el otro cree tener que reaccionar consecuentemente. Ante esta situación debemos preguntarnos cómo podemos impedir que todo un colectivo se vea desviado hacia acciones que el individuo consideraría criminales, y cómo podemos llegar finalmente (no siempre) a soluciones unívocas en el caso de soluciones ramificadas.

La única respuesta personal que encuentro es tomar como referencia unos puntos de vista más elevados; dicho con mayor claridad, puntos de vista morales, humanitarios o religiosos. Esto significa renunciar simultáneamente a las acciones oportunistas y a esperar que sea el otro quien dé el

primer paso positivo. Si yo no lo doy, no puedo esperar que lo dé el prójimo.

Si en las acciones colectivas el individuo no se guía por ideales superiores, no puede evitarse el camino del error que lleva a la catástrofe, precisamente a causa de la existencia de soluciones ramificadas. Cada cual debe responder de sus propias decisiones ante estas soluciones divergentes. ¿Prevalecerán sus criterios éticos o se sentirá un mero integrante del colectivo en su lucha por la vida y la supervivencia?

Algunas reflexiones acerca de la burocracia

La burocracia o, en rigor, el incesante crecimiento de la burocracia, es un fenómeno que la sinergética sólo ha comenzado a abordar. El aumento de la burocracia, con su creciente costo económico en materia de personal, parece contradecirse por completo con la actitud de constante racionalización eficaz que se observa en los procesos económicos. Ilustraremos brevemente algunos de los aspectos que generan este crecimiento.

Como ya se ha visto en el capítulo sobre economía, la obtención de beneficios es un motor decisivo en el comportamiento de las empresas. De ella depende su propia supervivencia. Muchos departamentos administrativos carecen de este efecto retroactivo que mide el éxito en función de los beneficios. Dado que no producen nada aparte de mucho papel escrito, resulta difícil medir su trabajo con los parámetros del éxito económico. Además, el aparato administrativo crece incesantemente, sobre todo en la esfera estatal, y ese mismo crecimiento ocasiona considerables pérdidas por fricciones internas, por el mero hecho de que cada vez son más los colaboradores o jefes que se ocupan de las mismas cuestiones, y porque el incremento en el número de colaboradores se traduce en un incremento al cuadrado del número de relaciones entre los individuos. Pero esto no vale exclusivamente para la administración estatal. No podemos dejar de constatar el crecimiento de las secciones administrativas en las grandes empresas, un crecimiento que seguramente suelen mermar en gran medida su competitividad. Un somero análisis de los procedimientos administrativos ya señala que a menudo éstos descuidan por completo los principios fundamentales de la autoorganización, los cuales por cierto aparecen constantemente en la naturaleza. Se produce un inmenso flujo de informaciones de las instancias

superiores a las subordinadas y viceversa. Desde el punto de vista de las ciencias naturales, este flujo resulta completamente absurdo. Por una parte, las acciones de los estamentos subordinados se reglamentan de forma cada vez más detallada, lo cual requiere un enorme caudal de reglas e instrucciones. Sin embargo, ni siquiera el mejor de los juristas o especialistas en administración puede prever todos los problemas puntuales que se plantean. Para ello tendría que ser Dios omnipotente. Así, unas reglas demasiado rígidas pueden resultar absurdas y llevar a decisiones inhumanas. Aunque tampoco debe ignorarse que una normativa demasiado laxa podría originar arbitrariedades; así, en el terreno jurídico, una persona podría ser absuelta y otra encarcelada por el mismo delito. Pero lo que habría que comprobar es si la concesión de márgenes de libertad más amplios no generaría un notable ahorro de tiempo de trabajo en muchos procedimientos administrativos, facilitando además las relaciones humanas.

El otro despilfarro, mucho mayor aún, se produce por el intento de controlar en detalle cada una de las instancias subordinadas y privarlas de cualquier tipo de responsabilidad propia. Esto requiere naturalmente mucho mayor cantidad de trabajo, dado que las instancias superiores vuelven a verificar una o varias veces lo que ya han controlado sus subordinados. De esta manera, el control puede llegar a costar más que los perjuicios ocasionados por una actuación negligente o, en casos aislados, incluso deliberadamente perjudicial de los niveles inferiores.

Finalmente, numerosos ejemplos de sistemas sinergéticos nos han permitido comprobar que algunos procedimientos de control, en los que el nivel superior interviene activamente en las acciones del nivel inferior, pueden llevar a situaciones caóticas, es decir, a evoluciones funcionales diametralmente opuestas al objetivo inicial. Todo aquel que haya tenido algún contacto con los procedimientos administrativos no podrá sino confirmar estos hechos.

La respuesta de la sinergética es relativamente sencilla. Pero no es fácil encontrar, en cambio, burócratas dispuestos a aceptarla.

De los ejemplos de la naturaleza animada e inanimada se deduce rápidamente que debemos permitir una autoorganización mucho mayor en los niveles inferiores: bastará fijar unas normas generales básicas que los diversos departamentos puedan desarrollar y completar según su propia iniciativa, de acuerdo con las circunstancias locales. Simultáneamente esto

permitiría reducir en gran medida el flujo de informaciones. En efecto, como muestra la naturaleza, no tiene sentido transmitir todas las informaciones —al contrario, es más bien contraproducente—, sino únicamente las pertinentes. El director de una fábrica de productos químicos, por ejemplo, no tiene ninguna necesidad de conocer en detalle los procesos químicos que intervienen en la obtención de los productos. Los datos decisivos para él son otros, como por ejemplo los costes de esos procesos. Para la introducción de nuevos procedimientos de fabricación cuenta precisamente con sus colaboradores y no puede, ni debe, inmiscuirse. Ellos son los especialistas en hallar nuevos procedimientos o descubrir nuevas sustancias.

No quiero ocultar mi escepticismo respecto a la posibilidad de frenar el crecimiento de la burocracia, a no ser que se produzca un desmoronamiento completo de la empresa o el Estado, con lo cual podría reanudarse todo el proceso a partir de cero.

XIV. ¿LAS ALUCINACIONES DEMUESTRAN CIERTAS TEORÍAS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL CEREBRO?

El cerebro humano debe de ser el sistema más complejo y fascinante que haya creado la naturaleza. Cuando el cirujano abre un cráneo se encuentra con una masa gris aparentemente casi homogénea y atravesada por delgadas arterias. En realidad se trata de una red increíblemente compleja de células nerviosas.

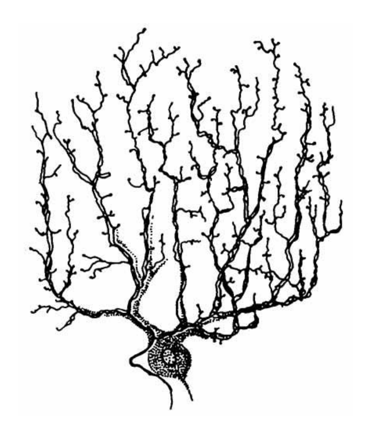


Fig. 14.1: ejemplo de una célula nerviosa.

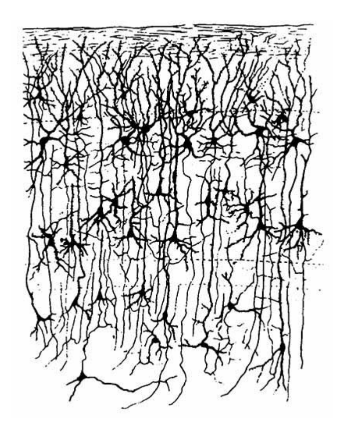


Fig. 14.2: ejemplo de una red de células nerviosas.

En la segunda mitad del siglo pasado, el italiano Camillo Golgi logró hacer visibles las células nerviosas dándoles una coloración. Una de cada cien células absorbe el colorante y adquiere un color cobrizo. Vemos entonces un nudo del que parte toda una serie de ramificaciones (fig. 14.1). Sin embargo, hace falta un microscopio para poder ver estas células nerviosas, también llamadas neuronas, porque sólo tienen 1/1.000 mm de diámetro. Se calcula que el cerebro posee unos cien mil millones de neuronas, tantas como soles tiene la Vía Láctea. Además de las células nerviosas, el cerebro posee las llamadas células gliales, que dan apoyo, sostén y alimento a las propias neuronas. Las células nerviosas a menudo están ordenadas por capas. Últimamente algunos investigadores también creen que dentro de

las capas, e incluso entre capa y capa, hay unas estructuras en forma de columna, entre cuyas células existen «conexiones» especiales y de este modo constituyen unidades funcionales.

Entre las neuronas existen muchas conexiones, que atraviesan el cerebro como alambres o cables telefónicos. Algunas llegan a células vecinas; otras, a regiones cerebrales lejanas, como si fueran cables transatlánticos (fig. 14.2). Y efectivamente funcionan como líneas telefónicas. Al igual que éstas, transmiten señales eléctricas con su propio sistema Morse. Pero mientras que el alfabeto Morse humano consta de puntos y rayas, el del cerebro se compone únicamente de puntos. Aun así, la naturaleza logra transmitir informaciones de distinto contenido emitiendo los puntos en sucesiones más rápidas o más lentas. Las neuronas a todas luces son capaces de elaborar las informaciones que reciben y de retransmitirlas a otras neuronas.

En las neuronas se pueden introducir hilos eléctricos finos (electrodos), mediante los cuales los investigadores del cerebro pueden explorar los fenómenos eléctricos que se producen en el interior de una neurona individual.

¿Existe la «célula abuela»?

Sin duda, la ciencia aún está lejos de haber aclarado el fenómeno del pensamiento. Pero existen algunos experimentos interesantes que esclarecen el funcionamiento de al menos algunas células, o también de zonas, del cerebro. D. H. Hubel y T. N. Wiesel realizaron unos experimentos con chimpancés, en los que les mostraban ciertos objetos (como cintas o maderos) o los movían. Los ojos de los chimpancés percibían las correspondientes impresiones luminosas y las retransmitían a una zona determinada del cerebro, que es la responsable de la visión. Los investigadores introdujeron sus electrodos en esta zona y comprobaron cómo reaccionan las células nerviosas ante determinados objetos colocados ante los ojos. Hubel y Wiesel llegaron a descubrir algo sorprendente: comprobaron que son siempre células muy determinadas las que reaccionan ante determinadas impresiones exteriores. No sólo hay células que reaccionan ante un madero, sino que incluso lo hacen con distinta intensidad según la orientación del mismo.

Es decir que una célula emite muchos puntos Morse o, en términos científicos, «lanza muchos impulsos nerviosos», cuando el madero tiene determinada orientación. Si el madero gira 90°, esta célula prácticamente deja de reaccionar (fig. 14.3). Incluso se encontraron células que reaccionaban de determinada manera conforme al movimiento de los maderos. Parece ser que estas células nerviosas pertenecen a una capa cerebral superior, y que las informaciones que provienen del ojo ya han sido preparadas y elaboradas en células nerviosos intermedias, para que finalmente se verifiquen estas reacciones especiales observadas, en las células nerviosas examinadas.

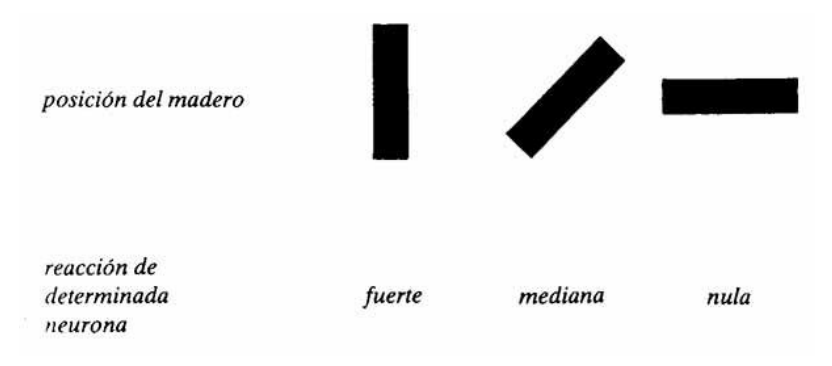


Fig. 14.3: reacción de determinada neurona según la posición de un madero en el campo visual.

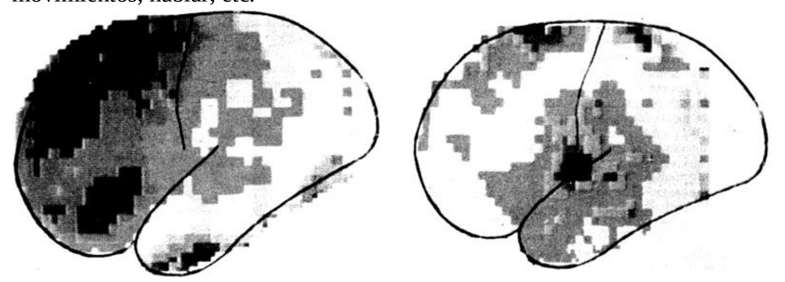
En otras palabras, aparentemente tienen lugar unos ciertos procesos de cálculo, cuyo resultado final aparece en las células examinadas. Si verbalizamos el resultado obtendremos formulaciones como «el madero está en posición vertical» o «este madero se encuentra en posición horizontal».

Estos hallazgos pueden inducirnos a corroborar una hipótesis sobre el funcionamiento del cerebro, establecida hace ya algún tiempo, para explicar cómo logra reconocer el cerebro las figuras o dibujos. Según esta concepción, en el cerebro habría unas células especiales que no sólo podrían reconocer un madero como tal, sino también, por ejemplo, un rostro completo. En la literatura sobre el tema, estas células hipotéticas se denominaban, en son de broma, «células abuela», porque permitirían que una persona

reconociera a su abuela, por ejemplo. La mayoría de los científicos ha abandonado esta hipótesis. Por una parte, pese a una búsqueda muy intensa, no se ha logrado hallar células capaces de reconocer, por ejemplo dibujos formados por maderos, en el caso de los chimpancés. Por otra parte, la investigación de las lesiones cerebrales provocadas, por ejemplo, por accidentes, muestra que las funciones del razonamiento y la memoria no están estrictamente localizadas, sino que se reparten sobre varias zonas del cerebro. Actualmente la ciencia tiende a suponer que en el caso de las funciones perceptivas, mnésicas y de razonamiento se trata de resultados manifiestamente colectivos, en los que interviene siempre un número bastante grande de neuronas. Pero si una gran cantidad de neuronas cumple sus funciones de manera colectiva, naturalmente debemos preguntarnos cómo podemos demostrar este hecho; en seguida nos ocuparemos de esta cuestión.



Fig. 14.4: la intensidad de la irrigación de distintas zonas del cerebro permite leer claramente su conexión por bloques conforme a diversas actividades, como movimientos, hablar, etc.



Pero permítasenos intercalar previamente una observación destinada a evitar malentendidos. De lo dicho hasta ahora podría concluirse que las diversas facultades, tales como la vista, el oído y el olfato, pero también el habla, están repartidas en todo el cerebro. Esto no es así en absoluto. Hace tiempo que se sabe, a partir de la investigación de accidentes, por ejemplo, que determinadas regiones cerebrales son responsables de funciones concretas, como el oído, el olfato, la vista y el habla. Dicho sea de paso, el centro del habla no es ciertamente un solo bloque, sino que está formado por dos bloques, uno de los cuales parece ser el responsable de la forma o gramática de lo que se dice, mientras que el otro se ocuparía más bien del contenido. Nuevos recursos médico-físicos han permitido hacer visible la función de las diferentes partes del cerebro. En efecto, cuando éstas trabajan más activamente, requieren una mayor irrigación sanguínea. Ahora bien, el flujo sanguíneo se puede marcar con medios físico-químicos, que no detallaremos aquí, lo cual permite verificar las zonas en que la irrigación sanguínea es más intensa, por un procedimiento análogo al de un aparato de rayos X (si bien aquí se trate de fenómenos físicos diferentes). Así se ha podido comprobar que, según las distintas actividades del hombre, se establecen conexiones en bloque entre zonas muy determinadas del cerebro (fig. 14.4). También éste es un fenómeno sumamente interesante, en el que numerosos sistemas individuales actúan conjuntamente de manera sinergética.

Pero ahora nos centraremos en lo que ocurre en una parte aislada del cerebro, por ejemplo en la que se ocupa de la percepción óptica. Existen algunos modelos matemáticos que describen el funcionamiento de tales partes; en algunos de ellos se supone, por ejemplo, que sólo existen dos tipos de neuronas. Esta afirmación se sustenta en hallazgos experimentales que muestran que ciertas neuronas refuerzan los impulsos nerviosos, mientras que otras tienen una función en cierto modo opuesta, es decir que suprimen las señales. Esta acción de las neuronas inhibidoras de entrada resulta sorprendente. Sin embargo, tienen una función importante; por ejemplo, nos permiten seguir reconociendo como cantos unos perfiles borrosos. No aburriremos a nuestros lectores con los detalles y nos centraremos, más bien, en la posibilidad de comprobar los principios de tales modelos de cerebro.

El punto clave de todos los sistemas que tratamos en este libro es la acción colectiva de conjunto de sus diversos componentes, como por ejemplo los nudos de la red, constituidos precisamente por las propias neuronas.

Pautas de excitación en el cerebro: hipótesis y experimentos

A lo largo de este libro, sobre todo en los capítulos dedicados a fenómenos físicos y químicos, hemos visto que los sistemas más diversos pueden formar dibujos totalmente similares. En los líquidos y en el aire, por ejemplo, aparecen los mismos movimientos giratorios de las moléculas, que se ordenan macroscópicamente. También hemos visto repetidas veces que lo fundamental no son las distintas interrelaciones entre los componentes individuales de un sistema. Los dibujos macroscópicos que aparecen son siempre los mismos cuando llegamos a los puntos de inestabilidad del sistema.

Durante uno de nuestros simposios sobre sinergética y al enterarse de estas analogías, en especial de la formación de rollos en líquidos, el biomatemático estadounidense Jack Cowan tuvo una idea audaz: relacionó las alucinaciones con la formación de pautas macroscópicas de excitación en el cerebro. Las personas que han tomado drogas (p. ej., LSD) dan cuenta de unas percepciones bien características. Ven, por ejemplo, círculos concéntricos o rayos o espirales que se proyectan hacia fuera (fig. 14.5). Cowan ya había desarrollado previamente una teoría matemática que explicaba cómo se transmite la imagen captada por la retina a una capa cerebral plana, que es la responsable de la percepción óptica. Estas representaciones podrían describirse de la siguiente manera: en la retina hay unas células nerviosas llamadas receptores, que captan la luz que llega hasta allí y la transforman en señales nerviosas. No entraremos aquí en si esto lo realiza cada célula por separado o todo un complejo de células. En cualquier caso, este punto transmite las señales, por medio de un cordón nervioso, a un punto determinado del cerebro. Puntos vecinos de la retina tienen sus «líneas telefónicas» especiales con el cerebro y allí también se conectan con puntos próximos entre sí. Aplicando ahora la norma de Cowan sobre la reproducción de las curvas de la retina en la capa cuadrangular del cerebro, llegamos a un descubrimiento sorprendente. En efecto las imágenes de las

alucinaciones corresponden precisamente a rayas en el cerebro, es decir, a pautas de excitación de células nerviosas, las cuales se distinguen únicamente por su orientación (fig. 14.5). Cowan incluso logró reducir percepciones alucinatorias complejas a sus pautas originales en el cerebro, en este caso a nuestros bien conocidos dibujos de panal de abejas.

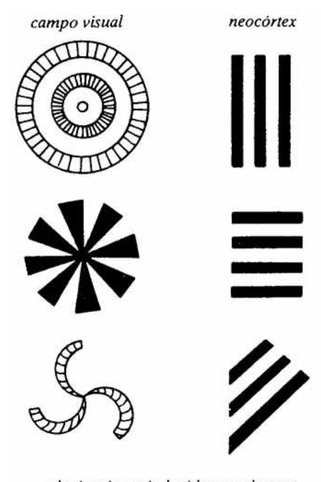


Fig. 14.5: de la teoría de las alucinaciones de Cowan.
Izq.: ejemplos de dibujós de percepciones tras la toma de drogas.
Der.: los dibujos de excitación ordenados en forma de franjas en el cerebro, según la hipótesis de Cowan.

¿Cómo debe interpretarse todo esto? Evidentemente, la ingestión de drogas desestabiliza la función cerebral, esto es, el antiguo estado de reposo es impulsado a una situación en la que debe ceder su lugar a un nuevo estado macroscópico, en este caso, a una pauta de excitación. Esto es muy similar a lo que ocurre en los líquidos, que al principio están en reposo, pero que luego —si se los calienta desde abajo— adoptan súbitamente un estado de movimiento macroscópico. Una vez superada la concentración de drogas con la cual se desestabiliza el cerebro, las neuronas comienzan a transmitir desesperadamente. Pero lo interesante es que no lo hacen *en salvaje confusión,* sino de manera *completamente ordenada.* Por supuesto, no afirmamos que el cerebro se mueva físicamente como un líquido. Sólo hemos intentado exponer plásticamente una analogía cuyo fundamento es puramente matemático.

Por ahora estas ideas siguen siendo pura especulación. No excluimos la posibilidad de su verificación experimental, pero para lograrlo evidentemente habrá que superar los actuales métodos de investigación del cerebro. Hasta el presente se examinaban las señales emitidas por una sola célula mediante la introducción de un solo electrodo. Para comprobar las excitaciones simultáneas de distintas células nerviosas será obviamente necesario emplear toda una red de electrodos. Lo cual parece abrir nuevos y fascinantes caminos en la investigación del cerebro.

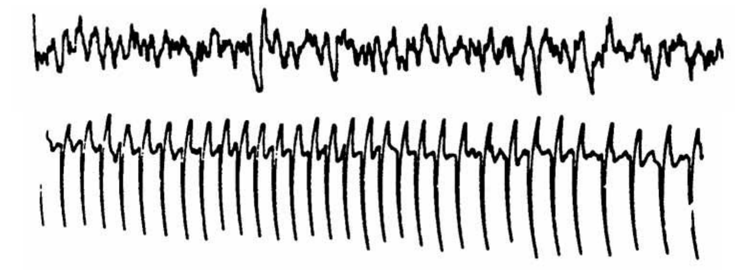


Fig. 14.6: EEG (electroencefalograma) de ondas cerebrales en los casos de actividad cerebral normal (arriba) y de un ataque epiléptico (abajo).

Puede parecer muy hipotética nuestra suposición de que muchas neuronas emitan simultáneamente sus impulsos nerviosos según unas pautas muy determinadas. Pero en la investigación del cerebro se ha observado efectivamente en determinado fenómeno la emisión coordinada de señales por parte de numerosas neuronas. Estas señales son tan regulares que se forma una onda eléctrica, la cual puede medirse mediante un electroencefalograma. Estas ondas cerebrales regulares aparecen en las crisis epilépticas (fig. 14.6). Las pautas regulares de excitación (en este caso, la oscilación rítmica) van asociadas, por tanto, a un fenómeno patológico. Desde este punto de vista, las oscilaciones rítmicas en las crisis epilépticas constituyen un hecho análogo a los hasta ahora hipotéticos dibujos localizados en el cerebro en el caso de alucinaciones. Es curioso que la coordinación de múltiples neuronas dé lugar a un comportamiento patológico. Con todo, no debemos concluir que el pensamiento no implique también efectos de correlación. Sin duda debe haberlos. Si nos imagináramos las neuronas como

lamparitas que se encendieran al excitarse, veríamos encenderse y apagarse continuamente las más diversas lamparitas. De momento sigue siendo un enigma para nosotros cómo se integra el encendido de las distintas lamparitas en un cuadro general significativo a semejanza de la imagen que se forma en la pantalla de un televisor. En la actualidad aún tenemos que basarnos en indicios relativamente indirectos sobre esta acción conjunta de un número elevado de neuronas.

Pensar en bloques

En efecto, muchos datos parecen señalar que el pensamiento se desarrolla en bloques completos. Cuando aprendemos un idioma extranjero en el país correspondiente, podemos percatarnos de que a menudo aprendemos frases enteras, en forma de giros idiomáticos, a la par que palabras sueltas. Luego esto nos permite construir nuevas oraciones con nuevos contenidos, por derivación y sustitución de palabras. De todos modos, no se trata de propugnar aquí el método de la palabra u oración completa, pues para el aprendizaje de la ortografía lo importante es justamente el efecto contrario, es decir, lo analítico, donde cada palabra aparece dividida desde el principio en sus componentes. Pero esto es sólo un comentario al margen.

El pensamiento por bloques enteros también se conoce en el caso de los maestros del ajedrez. En el tablero se enfrentan dieciséis figuras con significados parcialmente distintos (alfil, peón, caballo, rey, reina, torre). Un principiante aprende las diversas posibilidades de movimiento de las figuras, prueba mentalmente los diversos pasos y se imagina sus consecuencias: ¿podrá defender su torre o batir a la dama contraria? Los maestros, en cambio, piensan en términos de estructuras completas. Ven los trebejos en su ordenamiento mutuo y sobre la base de esta configuración ya saben cuáles tienen que ser sus próximas jugadas sin necesidad de analizar en detalle el movimiento de cada una de las piezas. A la inversa, puede ocurrir que a un maestro del ajedrez le resulte muy difícil pensar en términos de trebejos aislados si alguna circunstancia lo fuerza a hacerlo. En este pensamiento en bloques existe una importante diferencia entre un maestro del ajedrez y un juego de ajedrez electrónico. Como se sabe, hoy día hasta en las grandes tiendas se venden estas computadoras, contra las cuales se puede jugar al ajedrez eligiendo incluso el grado de dificultad. Sólo los grandes maestros

pueden derrotar a las mejores computadoras. Por tanto, cabría pensar que estas máquinas son mucho más inteligentes que los cerebros humanos. Pero la manera en que logran su objetivo es sorprendentemente primitiva. No hacen más que probar todas las posibilidades en un buen número de pasos, y luego calculan la mejor forma de diezmar los trebejos contrarios, los cuales, además, tienen fijado un paso determinado. Se trata, a todas luces, de un proceder completamente obtuso, a diferencia del pensamiento en configuraciones enteras. Este ejemplo ya pone de manifiesto que existen diferencias fundamentales entre las calculadoras y el cerebro.

Otro aspecto también parece ser importante para el funcionamiento del cerebro. Al conectarse cada vez más neuronas a una red, pasamos a un nivel de creciente complejidad desde el punto de vista organizativo. A pesar de ello, el cerebro aparentemente puede volver de súbito de un nivel *colectivo* al de las células individuales; por ejemplo, estimulando y seleccionando una neurona específica.

Desde el punto de vista de la sinergética, las ideas creadoras se ven bajo una nueva luz. Ante nuestros ojos surge una imagen nueva y coherente, como en el caso de un rompecabezas. En nuestro cerebro tiene lugar una especie de transición de fase de la conciencia, numerosos cabos sueltos se presentan de pronto como algo racionalmente ordenado, la penosa reflexión da paso a una certeza liberadora. La nueva comprensión dormitaba hacía tiempo en nuestra mente, pero repentinamente nos sentimos como iluminados. Es difícil resistirse a la impresión de que aquí están obrando procesos similares a los que conocemos en otros campos de la sinergética. A través de una fluctuación (la «iluminación») se forma un nuevo «ordenador» (es decir, la nueva idea), el cual logra subordinar, interrelacionar, esclavizar los distintos aspectos. Pero todo esto ocurre a su vez de manera autoorganizada: también nuestros pensamientos se organizan en nuevas conclusiones, nuevos conocimientos de causa. Quizá sea incluso ésta la circunstancia que nos permite entender muchos procesos de autoorganización de la naturaleza.

Cuerpo y mente

La perspectiva de la sinergética también permite encontrar una nueva vía de acceso al problema del cuerpo y la mente, o el cuerpo y el alma.

Partamos de la concepción del famoso investigador del cerebro sir John Eccles (nacido en 1903), concepción que defendió en el encuentro de laureados del premio Nobel en Lindau (1980). Eccles ve una posibilidad de resolver el problema del cuerpo y la mente en el hecho de que todas las partes del cuerpo parecen ser meros accesorios recambiables. El hombre, por tanto, podría reducirse en su esencia a determinadas zonas de su cerebro. El yo sería entonces el programador, y el cerebro, la computadora, es decir, el mero órgano ejecutor.

La sinergética llega a una conclusión distinta. Su concepción, que es la que defendemos en este libro, puede apelar de nuevo al concepto de «ordenador» y de componentes o «subsistemas» esclavizados, teniendo en cuenta que el ordenador y los subsistemas se condicionan mutuamente. En esta interpretación, los ordenadores serían nuestros pensamientos, en tanto que los subsistemas serían los fenómenos electroquímicos que tiene lugar en la estructura neuronal del cerebro. Múltiples ejemplos de este libro nos han mostrado que el ordenador y los subsistemas se condicionan mutuamente en su existencia y función. En este sentido, pues, el cuerpo y el espíritu en última instancia se condicionan el uno al otro, desde el punto de vista sinergético.

Una última palabra respecto de la interpretación de la función cerebral a través de modelos del cerebro. Al parecer, siempre se recurre al estado más avanzado de la ciencia en *otros* campos, para trasladar los resultados allí obtenidos al cerebro. Antes eran los circuitos eléctricos o incluso los engranajes mecánicos, de manera que se hablaba del «mecanismo de conexión» de los pensamientos. Hoy naturalmente la analogía se establece con las computadoras. ¿Con qué será mañana?

¿Crece el cerebro según un plan de construcción?

Dada la extraordinaria dificultad de explicar los complejos procesos que tienen lugar en el cerebro, los investigadores buscaron otra vía de acceso: estudiaron el desarrollo del cerebro. ¿Crece éste siguiendo un plan prefijado de construcción? En estos momentos se sabe, sucintamente, lo siguiente: en el desarrollo del embrión se forma inicialmente el llamado tubo neural, una formación celular tubular. En la región de este tubo se forman las células nerviosas, que se producen en serie, como en una fabricación en

cadena. Pero no se quedan en ese lugar, sino que son enviadas a otros puntos del cerebro. En sus nuevos emplazamientos, se difunden de manera muy parecida a la de los mixocelos (cf. cap. 9). Luego se reúnen en capas y forman una especie de hormiguero, como lo expresó una vez un investigador americano.

¿Cómo sabe cada una de las células adonde tiene que dirigirse? Aún se sabe poco al respecto. Pero hay indicios de que las células van «trepando» a lo largo de las células gliales —previamente formadas— hasta llegar a su posición definitiva.

No obstante, existe otro indicio, que también presenta una gran similitud con el comportamiento de los mixocelos. Como en las células del mixocelo, una sustancia se encarga de atraer a las células, en este caso, a las neuronas. Se trata del llamado factor de crecimiento neural, que se produce en determinadas regiones y se difunde a través del tejido. Cuando ciertas neuronas perciben su presencia, se desplazan en dirección a su fuente. En estas migraciones es-muy posible que algunas células se extravíen en estos desplazamientos.

Algunas de estas células extraviadas mueren luego, pero en casos aislados, las células mal situadas pueden provocar una afección cerebral.

Pero sigamos ocupándonos del crecimiento ulterior del cerebro sano. De las distintas células nerviosas comienzan a extenderse ramificaciones. Algunas de ellas buscan células próximas, con las que establecen contacto. Otras crecen hasta alcanzar células más lejanas del cerebro en desarrollo. Sin duda alguna, la construcción de la red de neuronas en el cerebro está autoorganizada. Hasta donde sabemos, las conexiones se establecen *motu proprio*, sin la intervención de una instancia superior. Los científicos tienen opiniones encontradas acerca del modo en que opera esta autoorganización. Pero quizás todas ellas sean correctas, aunque de validez limitada, en cada caso, a ciertas partes del cerebro o a determinados seres vivientes. Contrastemos simplemente ambas concepciones.

Una de ellas afirma que las ramificaciones que se extienden pueden identificar, gracias a unas moléculas especiales, las células con las que deben conectarse. Es como si las distintas neuronas tuvieran cerrojos que pudieran abrirse sólo con determinadas llaves (las respectivas ramificaciones). Con frecuencia se observa que inicialmente se forman más «líneas telefónicas» de las que luego se utilizan. Las sobrantes son reabsorbidas o

mueren, igual que algunas neuronas que no se han incorporado correctamente a la red.

Según ésta la estructura final de la red estaría formada por una trama determinada de conexiones, establecida de acuerdo con un plan prefijado, concretado en los cerrojos y las llaves moleculares.

La otra concepción se aproxima más a la idea de la autoorganización. Las conexiones se establecerían entre células individuales en medio de un confuso desorden. Pero con la llegada de impulsos nerviosos de los órganos sensoriales a esta red, determinadas conexiones se desarrollarían más que otras, conforme al grado de uso, o también por sí solas. Por tanto, la red, con su capacidad funcional, se formaría sólo durante, y a través de, su utilización. En la literatura profesional esta idea de que en el sistema nervioso las conexiones se fortalecen con su utilización, por ejemplo con la elaboración de percepciones, se conoce como «sinapsis de Hebb». Las sinapsis son determinadas piezas de unión intercaladas como cuadros de mando entre las células nerviosas.

Esa teoría afirma, por tanto, que las sinapsis se fortalecen con su mayor utilización. Lamentablemente, todavía no se poseen datos experimentales directos que indiquen que las sinapsis muy utilizadas crecen más que las otras. La idea de que una red nerviosa se desarrolla en el curso de su utilización es muy fascinante para los constructores de computadoras. ¿No se podrían construir también computadoras que organizaran de manera casi autónoma su actividad? Volveremos sobre ello en el capítulo siguiente.

XV. LA EMANCIPACION DE LA COMPUTADORA: ¿DESEO O PESADILLA?

El niño prodigio del siglo XX

La sustitución de la mano de obra por máquinas es un rasgo característico de nuestra época. Hasta hace poco, la idea básica era liberarnos así de los trabajos serviles. Pensemos tan sólo en los numerosos electrodomésticos como por ejemplo la lavadora, la máquina lavaplatos y el aspirador. De forma análoga penetraron las máquinas en las fábricas, donde asumen desde hace tiempo las tareas monótonas, como empaquetar chocolate. Pero desde algún tiempo atrás, la investigación y el desarrollo se dirigen sorprendente y crecientemente a reemplazar también las capacidades intelectuales del hombre por máquinas. La técnica de las computadoras es un ejemplo característico, aunque con frecuencia se sobreestime muchísimo la capacidad de las computadoras para llevar a cabo una genuina actividad pensante. Toda persona que se ocupe de la programación de computadoras sabe cuán tontas son; no logran subsanar por sí solas ni el más sencillo de los errores, a menos que estén expresamente programadas a tal fin. De sobra lo saben los empleados de las oficinas que han introducido la informática en su contabilidad. De pronto toda la operación contable desaparece en el ordenador y resulta imposible recuperarla. Nadie puede enseñarle a posteriori al ordenador a hacer reaparecer la operación en cuestión, si antes no se le han dado instrucciones muy precisas. Pero prescindamos de la cuestión de la inteligencia de las computadoras; ya la retomaremos más adelante en este mismo capítulo.

En efecto, si prescindimos de algún fallo ocasional, las computadoras logran unos resultados sorprendentes. Son seguramente la mayor revolución técnica de nuestro siglo. Antes oíamos hablar de sus aplicaciones científicas, sobre todo en el terreno de los viajes espaciales; hoy nos las encontramos a cada paso. La reserva de un asiento en el tren, la compra de un billete de avión, los resultados de las elecciones o incluso la búsqueda de un compañero en una agencia matrimonial son servidos por ordenadores. Se encuentran en las oficinas y también, crecientemente, en nuestros propios hogares, donde nuestros hijos ya no quieren renunciar a ellos. Basta

pulsar unos pocos botones para poder prescindir de la antigua tabla de logaritmos o evitar tener que sumar largas columnas de números. Su instalación en los automóviles permite economizar gasolina y en las telecomunicaciones logran una distribución óptima de la carga de las líneas. Ejecutan planos de construcción, indicando, por ejemplo, dónde deben situarse las puertas y las conexiones eléctricas, y dibujan las casas en cualquier perspectiva deseada, incluso con árboles a su alrededor. Las computadoras hacen los cálculos para la construcción de puentes y diseñan polígonos de viviendas y refinerías químicas.

Se emplean para la formación de pilotos y astronautas, en los simuladores de vuelos; guían cohetes a la luna y a los planetas más lejanos de nuestro sistema solar. No sólo conducen máquinas-herramientas, sino que incluso dirigen complejos procesos de fabricación, y la gran ilusión de los sistemas de economía planificada debe ser contar con una supercomputadora que planifique y gobierne todo el proceso económico. Pero precisamente aquí se vislumbran unos límites, que en el lenguaje informático de aquellos países se denominan «cuellos de botella informativos». Para explicar este concepto comencemos con un ejemplo muy simple.

En la mayoría de las viviendas la temperatura ambiental se regula automáticamente. Para ello graduamos el termostato, ajustándolo a determinada temperatura, llamada «valor de régimen». Un detector mide constantemente la temperatura ambiente, el llamado valor real. Si los valores difieren, el termostato envía la señal correspondiente a la calefacción central, para que aumente o disminuya la temperatura del agua caliente.

Si trasladamos todo el principio a un proceso de producción, o incluso a un complejo sistema económico, se presenta el siguiente problema fundamental: deben medirse numerosos valores reales, y la computadora tendrá que calcular qué disposiciones deberán adoptarse para obtener los valores de régimen. Pero esto requiere un cálculo muy difícil, que, por ende, exige mucho tiempo. Este cálculo puede tardar tanto que la computadora ya no llegue a tiempo de dar las órdenes necesarias... y todo el dispositivo se desmorona porque la información —para hablar en imágenes— no ha podido fluir con suficiente rapidez a través del «cuello de botella». En algunos casos especiales, la respuesta a este problema podrá ser una computadora aún más veloz, pero la respuesta general debe buscarse en la autoorganización de los respectivos procesos parciales, a los que sólo deberán

asignarse previamente determinadas magnitudes para asegurar el desarrollo orgánico y global del proceso.

El problema de la autoorganización también se plantea en la propia computadora, de la que nos ocuparemos brevemente a continuación, a fin de conocer sus posibilidades y sus eventuales limitaciones. ¿Cómo funciona «en principio» y de qué manera podemos aprovecharla para nuestros fines? En otras palabras, ¿cómo debemos programarla? Tratemos primero esta última cuestión.

La programación

En esencia, un macroordenador opera de modo muy similar a una minicalculadora de bolsillo. Si la tarea consiste, por ejemplo, en sumar los números 3 y 5, en la calculadora de bolsillo deberemos pulsar el 5, el signo de adición, el 3 y finalmente el signo de igualdad; este último, para que la calculadora sepa que en ese momento tiene que indicar el resultado. En términos más generales, esto significa que damos a la computadora unas órdenes que tienen la siguiente forma: toma un número (p. ej., el cinco), luego, otro número (p. ej., el tres) y súmalos. A continuación, anota el resultado.

Todo el procedimiento puede dividirse en dos grandes grupos, a saber, la selección de los números específicos (p. ej., 3 o 5) y el cálculo propiamente dicho. Podemos imaginar los números escogidos como bolitas rotuladas con un número, situadas en unas cajas. Entonces el procedimiento de cálculo se puede expresar en los siguientes términos: saca el número 5 de la caja n.° 1 y súmale el número 3 de la caja n.° 2. Coloca el resultado en otra caja, en la caja n.° 3, por ejemplo. Y así sucesivamente, en el caso de un cálculo más complejo; por ejemplo, si ahora es preciso que el número de la caja n.° 3 sea multiplicado por el de la caja n.° 4, etc. La tarea fundamental es, por tanto, muy simple en todos los casos, pero adquiere un amplio espectro de posibilidades, gracias a la facultad de variar los números contenidos en las cajas n.° 1 y n.° 2, o también de continuar con el procedimiento. Además, también podemos decirle a la computadora: vuelve a colocar el resultado obtenido en la caja n.° 1. Esto permite introducir los llamados bucles, con los que se itera una y otra vez el procedimiento; lo cual permite multiplicar 2×2×2×2, por ejemplo.

En las computadoras científicas, el programador debe cumplir también estas dos tareas diferenciadas. Debe indicar paso a paso los cálculos que deberá realizar la computadora (como sumar, restar, multiplicar, dividir), y procurarle una reserva de números que le permita realizar repetidamente la misma secuencia de cálculos, pero en cada caso con nuevos datos.

El verdadero trabajo del programador consiste, por tanto, en establecer los cálculos parciales propiamente dichos. La provisión de los distintos datos, en cambio, no suele ser difícil. Sólo es necesario colocar los valores numéricos en las respectivas cajitas. En muchos casos basta un programa corto, es decir, con relativamente pocos cálculos parciales, pero capaz de elaborar muchos datos; por ejemplo, el cálculo de intereses bancarios, primas de seguros, salarios, etc. Si la operación es más compleja, el gasto en personal altamente cualificado llega a ser enorme en determinadas circunstancias. En este contexto se plantea la pregunta de si no podría economizarse actividad humana construyendo una computadora capaz de autoprogramarse. Pero sigamos por el momento con la programación humana.

Aunque los diversos cálculos parciales sean muy simples, éstos pueden combinarse de manera muy distinta. Además se pueden instalar los bucles antes mencionados, destinados, por ejemplo, a repetir un cálculo aproximado tantas veces como se estime necesario, hasta un resultado satisfactorio. Para el lector interesado en las matemáticas citaré tan sólo el ejemplo de la extracción de raíces.

Pero las computadoras pueden hacer algo más, y es aquí donde comienza la esperanza, aunque también la dificultad. Así como antes almacenábamos números en las cajas, que luego quedaban a disposición de la computadora para que los elaborara, también podemos almacenar señales que significan determinado orden de cálculo. En este caso le diremos a la computadora: extrae la bolita siguiente en la caja n.° 3 y haz lo que esa bolita te diga (desde luego, en realidad la computadora no extrae bolitas como en la lotería, sino que tiene un almacén de datos del que obtiene señales eléctricas procedentes de puntos determinados; estas señales representan la orden de hacer tal o cual cosa). Esta «bolita» puede significar, por ejemplo: en el paso siguiente deberás multiplicar los dos números que se te darán a continuación. Pero también puede decir: ejecuta determinado programa de cálculo, muy complejo. Mediante esta concatenación de instrucciones diversas los procesos de la computadora pueden llegar a resultar

muy complejos. A veces aparece entonces una «variante bastarda» de la «especie» de los programadores, que en la jerga técnica inglesa se llama «despedazador». Un despedazador es un programador que idea un programa tras otro, hasta que acaba perdiendo la visión del conjunto y se queda sentado ante la computadora devanándose los sesos hasta altas horas de la noche, para arrancarle nuevos trucos. Así va enzarzándose cada vez más, y a la mañana siguiente comprueba que en la computadora se ha creado un embrollo inextricable. Este ejemplo pone de relieve que la programación de computadoras puede ser muy traicionera.

Las dificultades con que tropiezan los «despedazadores» son bien conocidas por los demás programadores. Esto llevó a uno de los principales fabricantes de computadoras a hacer analizar, por ejemplo, la construcción de macroordenadores desde el punto de vista de la arquitectura. Pero estos análisis no dieron ningún resultado, hecho nada sorprendente para la sinergética. En efecto, la computadora no contiene sólo estructuras estáticas, sino que en su interior se desarrollan constantemente unos procesos que deben estar coordinados y mutuamente condicionados. En otras palabras, una computadora es un sistema marcadamente sinergético.

Redes de computadoras

Hoy día una macrocomputadora tiene numerosas entradas y salidas. En muchos recintos individuales hay terminales en las que se introducen las instrucciones para la computadora y donde los resultados aparecen luego en la pantalla o son impresos por máquinas impresoras.

Pero últimamente se está imponiendo una tendencia que promete convertirse en un importante campo de actuación de la sinergética. En efecto, en vez de una gran computadora, se quieren construir muchos ordenadores pequeños interconectados que asuman las tareas de la antigua macrocomputadora. Se desea, precisamente, que ya no exista una gran computadora dedicada a dirigir, como un maestro, las pequeñas terminales de entrada y salida, sino que éstas se «pongan de acuerdo» entre sí (fig. 15.1). Las ventajas de un sistema de muchos ordenadores pequeños son evidentes: se puede fabricar en serie; es posible intercambiarlos, lo cual facilita su mantenimiento; y se los puede distribuir desde el principio entre las distintas salas de un centro de cálculo u otras instituciones. Estos ordenadores

pueden ser idénticos, pero también pueden estar equipados en parte para realizar tareas más específicas; de modo que uno de ellos tenga una pantalla, otro, una impresora, etc. Ello acarrea indefectiblemente nuevos problemas relacionados con el grado de autoorganización que puede exigirse a estas redes de computadoras pequeñas. Una de las posibilidades consiste en establecer una vinculación estrecha y fija entre ellas, con lo cual obtenemos en realidad otra macrocomputadora. La otra opción implica que las computadoras establecen ellas mismas sus interrelaciones. Una computadora que necesitase ayuda debería entonces enviar señales a otra computadora. Estas señales llevan una enseña, como dicen los especialistas en informática. La enseña informa sobre el origen y el destino de la señal y pregunta si la otra computadora estaría dispuesta a asumir la tarea. En el lenguaje técnico se habla entonces de un «protocolo» en el que la computadora aludida tiene que comunicar a la emisora su disposición de asumir la tarea. Tras algunos intercambios se llega así, finalmente, al traspaso de la tarea. Esto requiere naturalmente algún esfuerzo adicional al que se necesita en el caso de un sistema de conexiones fijo. Es tarea de los constructores de computadoras hallar un compromiso óptimo entre el rígido entrelazamiento preprogramado y la distribución de tareas autoorganizada, aunque sólo estamos en los inicios de esta evolución. Se pretende, por ejemplo, que las computadoras distribuyan sus tareas y paralelamente realicen cálculos para llegar a nuevas distribuciones de tareas, etc. Los especialistas hablan de la instalación de «estructuras profundas» destinadas a llevar a cabo esos procesos de autoorganización.

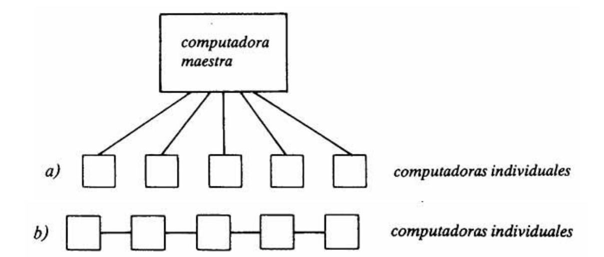


Fig. 15.1: computadoras organizadas y computadoras que se autoorganizan. Arriba: una computadora maestra distribuye las tareas: organización. Abajo: las computadoras se reparten las tareas ellas mismas: autoorganización.

¿Qué son esas «estructuras profundas»? En este punto nos puede ayudar la comprensión de las constataciones que hemos ido viendo hasta aquí, aun cuando no se refieran propiamente a dichas estructuras. Recordemos que en los líquidos o en las reacciones químicas pueden formarse dibujos macroscópicos si modificamos las condiciones exteriores; por ejemplo, si suministramos más energía al sistema. Lo mismo cabe esperar en las redes de computadoras. Si planteamos más tareas a una computadora, aumentando, por ejemplo, el número de datos introducidos, los procedimientos de cálculo podrán distribuirse automáticamente, es decir, autoorganizadamente, de una manera del todo nueva entre las distintas computadoras. Lamentablemente, pueden producirse también otros fenómenos que ya conocemos por la sinergética, como por ejemplo oscilaciones. En ese caso, la distribución de tareas entre las distintas computadoras fluctúa periódicamente, con lo cual se origina un enorme flujo de datos entre las computadoras. También aquí el especialista puede apelar a la sinergética para aprender a eliminar esas oscilaciones. Y también le resultarán útiles las analogías con la estructura neurona! del cerebro. Por ejemplo, las distribuciones de tareas que se presenten repetidas veces pueden utilizarse para que unos vínculos inicialmente laxos vayan convirtiéndose en vínculos fijos. Aquí intervendrán los principios de la competencia, la «supervivencia» de la vinculación más eficaz y la supresión de las demás. Esto puede llevar a que las computadoras finalmente comiencen a pensar en bloques, como un buen jugador de ajedrez (cf. el capítulo anterior)- Los bloques no necesitan estar localizados en una computadora específica; pueden extenderse sobre varias computadoras.

Por último, podría pensarse en imponer a toda la red de computadoras unas condiciones que actuaran de manera similar al principio darwiniano de la supervivencia; por ejemplo, que la red deba resolver siempre la misma tarea de manera distinta, conservando finalmente sólo aquella vía de solución que requiera la menor cantidad de tiempo.

La concreción de estas ideas no parece muy distante, siempre y cuando sólo modifiquemos un poco cada vez los planteamientos de las tareas. Entonces, a semejanza de lo que ocurre en otros sistemas sinergéticos, de pronto pueden formarse nuevas «estructuras», originando, por tanto, una nueva distribución de tareas entre las computadoras.

La situación se presenta mucho más difícil cuando la red de computadoras debe resolver un problema totalmente nuevo. En tal caso no deben esperarse milagros. Al igual que en la vida humana, la red tendrá que probar primeramente varias vías de solución e ir aprendiendo de ellas.

Visto que las computadoras pueden hacer tantas cosas queremos preguntarnos ahora cuál es su punto más débil en comparación con el ser humano. Éste no reside, ciertamente, en la elaboración de una gran cantidad de datos siguiendo siempre el mismo esquema; más bien aparece en el problema del reconocimiento de figuras o dibujos.

Identificación de figuras

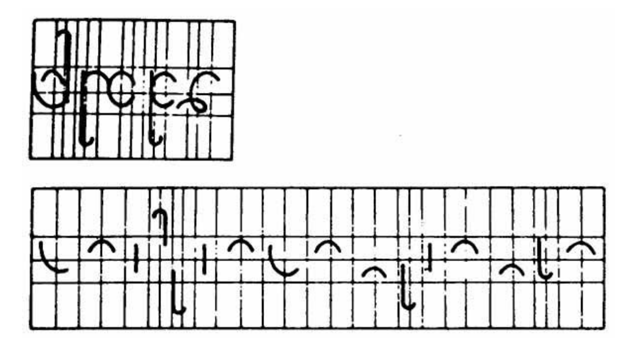


Fig. 15.2: reconocimiento de dibujos por descomposición en componentes simples («primitivas»).

La identificación de figuras es condición previa para numerosos procesos automatizados. Una soldadora automática, por ejemplo, tiene que averiguar en que punto debe soldarse la pieza correspondiente. La tarea es aún más interesante cuando la máquina debe reconocer figuras más complejas. Un ejemplo conocido es la máquina lectora, que es capaz de descifrar y reconocer escrituras. También aquí tienen un papel decisivo los efectos sinergéticos. El primer paso es descomponer una letra en determinados componentes, llamados «primitivas» o caracteres elementales (fig. 15.2). Estos elementos primitivos se eligen de manera que la máquina pueda percibirlos,

por ejemplo, en forma de una raya o un arco situados en determinado lugar y con una curvatura determinada.

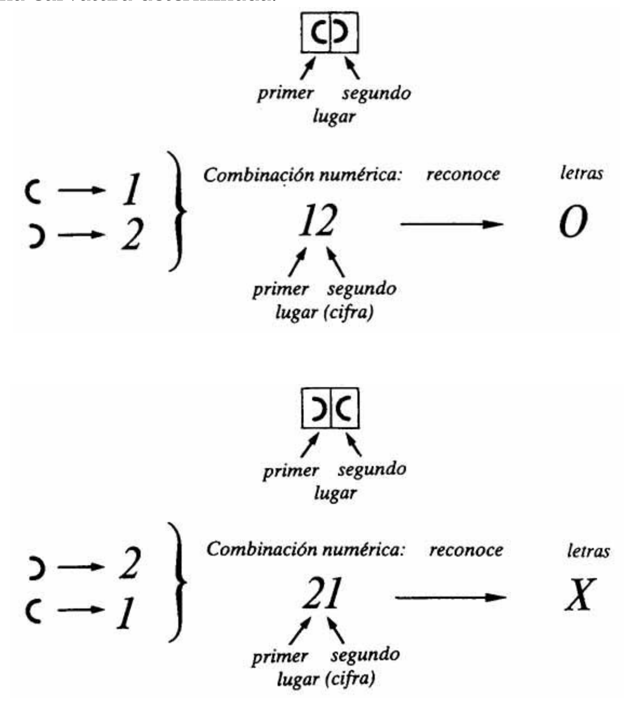


Fig. 15.3: ejemplo sencillo de la asignación de números a primitivas en determinados lugares.

Estas «primitivas» pueden ser exploradas por células fotoeléctricas y «reconocidas» mediante conexiones relativamente simples. A cada uno de los elementos primitivos situado en determinado lugar se le puede asignar un número (fig. 15.3). Del mismo modo que una cerradura de combinación sólo puede abrirse con determinada combinación de números, cada letra se define por una combinación numérica determinada que corresponde a todas sus primitivas. Por tanto, la máquina debe comprobar si en su registro se encuentra una combinación de números que represente precisamente, por ejemplo, la letra «A».

La dificultad de este reconocimiento reside en que todo él puede estar viciado; por ejemplo, si no se ha podido identificar perfectamente uno de los elementos primitivos y se ha confundido, digamos, un trazo vertical con un arco abierto hacia la derecha. Volvemos entonces al viejo problema de cómo corregir un enunciado defectuoso. Son procesos que ya encontrábamos en el láser y en los líquidos, donde por cierto también podía ocurrir que algunos subsistemas formasen inicialmente rancho aparte; al comienzo algunos de los átomos láser todavía podían emitir ondas «equivocadas», o no todas las moléculas de líquido participaban aún en el movimiento giratorio. Pero el «ordenador» las incorporaba muy pronto al orden general.

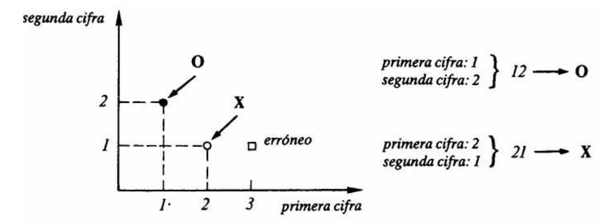


Fig. 15.4: ejemplos de la representación de números en un sistema de coordenadas. En el primer caso se identifica una *O.* en el segundo, una *X.* Si la combinación numérica rezara (3.1) sería una letra defectuosa. En la práctica hay que trabajar con un sistema multidimensional de coordenadas.

En el caso de la máquina esto significa que cuando se presentan datos deficientes, que naturalmente no figuran en su índice, tiene que buscar el dato correcto más parecido al falso. A este efecto se pueden desarrollar procedimientos especiales de naturaleza matemática. Gráficamente éstos consisten en asignar puntos a los datos numéricos, como en un sistema de coordenadas (fig. 15.4), midiendo luego las distancias entre dos de esos puntos. También aquí puede presentarse nuevamente la ruptura de las simetrías (fig. 15.5). Una combinación errónea puede estar a igual distancia de dos combinaciones correctas. En este caso la máquina no sabrá qué hacer, a no ser que se le incorporen otros criterios de decisión. Si la máquina debe leer una palabra o frase escrita y no puede decidir si determinada letra es una O o una X, la decisión —igual que en la esfera humana— sólo puede buscarse considerando la palabra o incluso la oración en su totalidad. Las reglas gramaticales o, frecuentemente, sólo el significado que se desprende

del contexto permiten decidir cuál tendría que ser la letra correcta. Este ejemplo muestra claramente que el reconocimiento de signos puede convertirse de pronto en un procedimiento enormemente complejo, en cuanto comienzan a ser decisivos los contenidos.

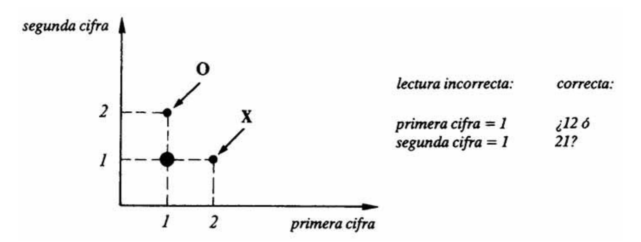


Fig. 15.5: ejemplo de un error. La máquina ha leído en ambos lugares la cifra 1, pero las únicas letras posibles son, como en la figura 15.4, una *O* o una *X*. La letra incorrecta está a igual distancia de las dos correctas. La decisión definitiva requiere una ruptura de la simetría.

El método aquí expuesto es relativamente rígido porque las primitivas observadas, es decir, los trazos de una escritura, deben tener una ubicación muy precisa. En el caso de la escritura de una máquina de escribir, que está bastante normalizada, no es muy difícil lograrlo, pero ante la escritura manual la máquina se encuentra bastante desamparada. Por esto se han desarrollado otros métodos para reconocer rasgos escritos, aprovechando el hecho de que los trazos tienen que guardar determinada relación entre sí, aproximadamente como las palabras se sitúan en determinado orden en la oración. De hecho, esta analogía entre la gramática de una lengua y el ordenamiento de las primitivas se aprovecha para elaborar indicaciones que debe respetar la máquina al combinar las primitivas. La máquina se encuentra entonces una y mil veces, como en un laberinto, ante una bifurcación de los caminos; pero finalmente el ordenamiento mutuo de las primitivas señala la vía correcta para componer la letra como tal.

Percepción

¿Qué significa en este contexto el concepto de percepción? Significa que a una letra que los hombres percibimos como una A le asignamos determinado número en la computadora. Este mismo número puede emplearse para otras instrucciones. Si pensamos, por ejemplo, en un clasificador de cartas, éste asigna a la palabra Hamburgo determinada combinación numérica en función de las letras que la componen. La combinación numérica puede ser valorada a su vez por la computadora para dar al clasificador la orden de «envía esta carta a la cinta que recibe las cartas para Hamburgo» (fig. 15.6).

HAMBURGO → combinación numérica → orden de mando

Fig. 15.6.

En la percepción humana destaca su capacidad de comprender también noticias mutiladas; es decir que el cerebro es capaz de completar por sí mismo las partes que faltan en la información, lo cual parece ser un componente esencial de nuestra capacidad perceptiva. Incluso las formas que aparecen sólo insinuadas son comparadas automáticamente con formas que conocemos y completadas en ese sentido. Un proceso en el que la interacción de las informaciones singulares desempeña nuevamente un papel decisivo. En los últimos años se ha logrado construir máquinas capaces de llevar a cabo este proceso, el cual se desarrolla de manera similar al reconocimiento de una letra que acabamos de comentar. La máquina compara una imagen defectuosa con otra de referencia, por ejemplo, descomponiéndola en sus rasgos fundamentales. A continuación busca la imagen de referencia que más se aproxime a la que se le ha presentado. Una vez encontrada, la reproduce íntegra; de esta manera se reconstruye la imagen mutilada (fig. 15.7). Esta capacidad de las máquinas también se llama «memoria asociativa». Lo determinante son los enlaces entre los elementos para formar un todo que pueda completarse adecuadamente.

Pero las máquinas pueden reconocer no sólo el lenguaje escrito sino también el hablado. Para ello, los sonidos pronunciados se transforman en oscilaciones eléctricas que se proyectan en una pantalla. Se forma entonces un trazo en el que una secuencia característica de picos corresponde en cada caso a un sonido determinado (fig. 15.8). Estas formas características se comparan en la máquina con dibujos de referencia, de manera que una A pronunciada puede transformarse finalmente en una A escrita. Dicho sea

de paso, más recientemente también se ha logrado concretar el proceso inverso, es decir, transformar en sonidos las letras que se introducen pulsando un teclado.

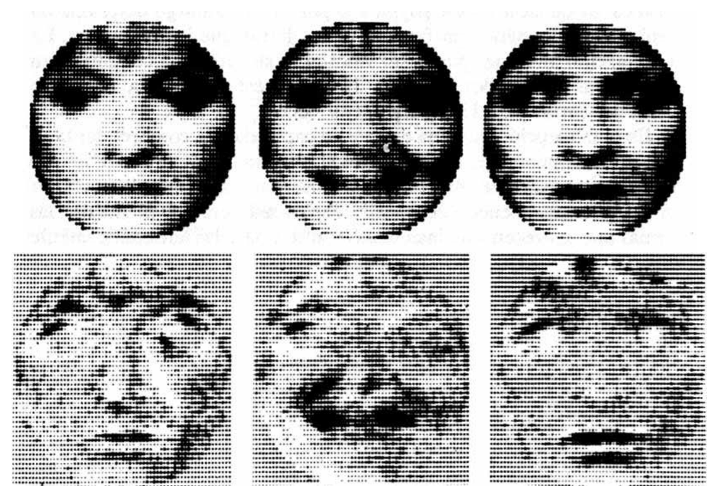


Fig. 15.7: las imágenes de referencia de la fila superior, que denotan distintas expresiones del rostro de la misma persona, están almacenadas en la computadora. A la máquina se le presentan los dibujos de la fila inferior. La máquina es capaz de reproducir las muestras de la fila superior.

Como puede verse en todos estos ejemplos-, en general los elementos comprobados por la máquina se transforman en determinadas combinaciones numéricas. Esto recuerda ciertamente los procesos del sistema nervioso, en el que las más diversas impresiones sensoriales se transforman siempre en impulsos nerviosos, es decir, en señales eléctricas de la misma naturaleza. Los impulsos nerviosos son, por tanto, el código universal con el que opera el sistema nervioso. En esa medida no debe sorprendernos que en las computadoras los procesos de percepción no sean, en rigor, sino señales en forma de impulsos eléctricos, que transmiten, por ejemplo, combinaciones numéricas.

Como decíamos, el paso siguiente, es decir, el que va de la identificación de una letra o palabra a una palabra con un significado, es cualitativamente nuevo y muy difícil. Esto se comprueba especialmente cuando se

quiere emplear la computadora para traducir de un idioma a otro. Ya hemos visto que la computadora puede transformar cada palabra en una combinación numérica. Con la ayuda de esa combinación la computadora busca entonces en una especie de diccionario otra combinación numérica, que corresponde a la correspondiente palabra en la otra lengua. La computadora usa esa segundo combinación numérica para expresar la palabra en el idioma extranjero.

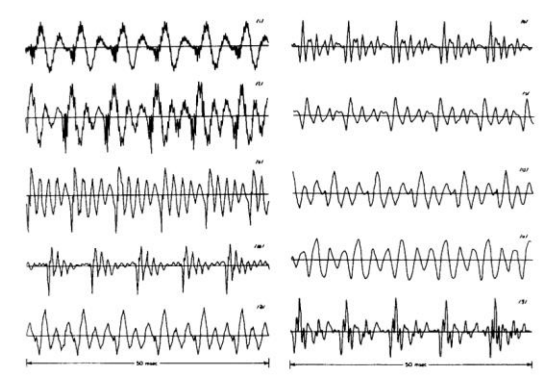


Fig. 15.8: formas de las ondas acústicas de varias vocales anglo-americanas (hacia la derecha se representa el tiempo; hacia arriba, la amplitud).

La verdadera dificultad se presenta cuando se trata de sutilezas del idioma; por ejemplo, cuando a una misma palabra de partida corresponden varias palabras distintas en el otro idioma, lo cual ya sucede de manera primitiva incluso tratándose de homónimos. La palabra banco, por ejemplo, puede referirse a una institución financiera o a un mueble. De nuevo nos encontramos aquí ante el problema fundamental de la ruptura de la simetría. Ambos significados tienen iguales derechos; el significado acertado sólo se puede deducir del contexto. Pero, ¿cómo puede establecer el contexto una máquina? En este punto queda especialmente claro que nos hallamos ante una jerarquía de problemas que nos introduce en cuestiones cada vez más complejas. Sinergéticamente hablando, la máquina se encuentra con la tarea de encontrar una adecuada jerarquía de ordenadores. Las palabras sueltas deben reunirse en un significado, producir un ordenador. En muchos casos el ordenador a la vez está en condiciones de «reparar» (dentro de

ciertos límites) también oraciones mutiladas, igual que la onda láser es capaz de llamar al orden a un átomo que esté haciendo la guerra por su cuenta. A veces, a una frase (escrita) deben asignársele varios ordenadores; ello ocurre cuando ésta tiene más de un sentido. En ese caso la máquina tiene que subir otro peldaño en la jerarquía para fijar los ordenadores de manera unívoca. Ahora bien: la dificultad consiste a menudo en que en el nivel superior debe haber un enorme acopio de experiencia humana para interpretar «correctamente» un escrito.

El mundo subterráneo de la computadora

Hasta ahora hemos hablado principalmente de aquella parte de la técnica de la informática que se denomina *software.* Contemplemos ahora cómo procede la computadora en detalle para realizar sus cálculos. La parte de la que nos ocuparemos ahora se llama *hardware* en el lenguaje técnico.

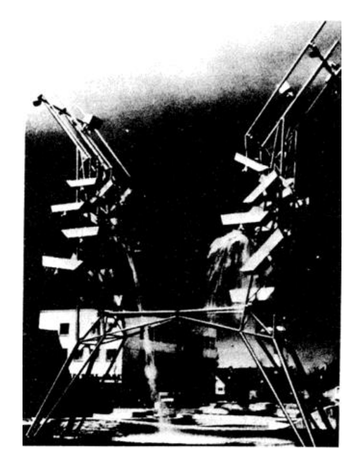


Fig. 15.9: estructuras móviles.

En la computadora los pasos del cálculo o lo que también se llama pensamiento lógico se descomponen en pasos mínimos. Estos pasos simples pueden ser «y», «o», «sí», «no» o también el almacenamiento en una memoria, es decir, en un juego de cajitas. Tales funciones lógicas las pueden ejecutar incluso unas instalaciones muy simples. En los parques públicos solemos ver estructuras móviles impulsadas por agua (fig. 15.9). El agua

fluye, por ejemplo, desde arriba sobre una bandeja que se vuelca cuando el agua llega a cierto nivel. El agua volcada se distribuye entre otras bandejas, etc. Al principio el movimiento de las bandejas nos parece del todo irregular, pero después de mirarlas durante cierto tiempo nos percatamos de que los vuelcos obedecen a reglas rigurosas, y precisamente a unas reglas que constituyen pasos lógicos.

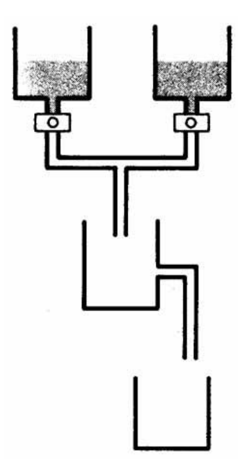


Fig. 15.10: ejemplo de una conexión que realiza el proceso lógico «y». El recipiente inferior sólo se llena de agua si antes estaban llenos los dos recipientes superiores.

Observemos ahora otro ejemplo de estructura móvil: dos bandejas o recipientes que pueden llenarse de agua. Los comunicaremos como se indica en la figura 15.10, de modo que el agua pueda caer en otro recipiente. De allí puede llegar finalmente a un cuarto y último recipiente. Si los dos recipientes superiores están vacíos, el inferior también quedará vacío. Si sólo uno de los recipientes superiores lo está, el inferior también seguirá vacío. Sólo se llenará si están llenos ambos recipientes superiores. También podemos formularlo de la siguiente manera: el recipiente inferior se llena a condición de que estén llenos los recipientes superiores 1 y 2 (fig. 15.11). Ésta debe de ser una de las ilustraciones más simples del vínculo lógico «y». Ambas precondiciones tienen que cumplirse.

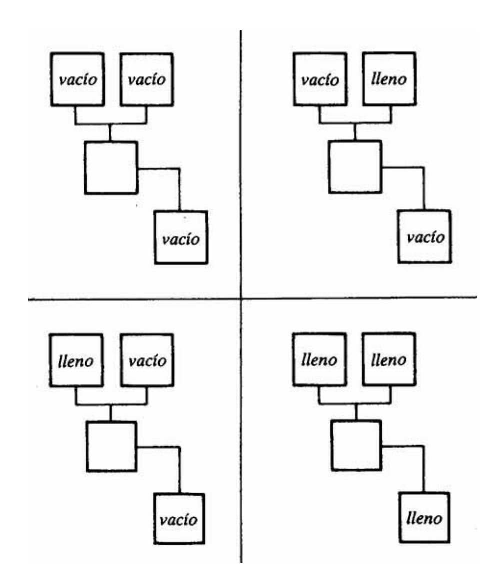


Fig. 15.11: este esquema ilustra cómo los recipientes de agua logran concretar la conexión lógica «y» (tanto como).

Numerosos procesos vitales se desarrollan según este vínculo. Si preparamos un huevo pasado por agua, 1.°) el agua tiene que hervir y 2.°) el huevo debe permanecer un tiempo mínimo (p. ej.: 4 y 1/2 y minutos) dentro del agua hirviente para endurecerse. Este ejemplo cojea en la medida en que la determinación de qué es un huevo pasado por agua dependa tal vez del gusto individual; eso no sucede en las matemáticas, donde las cosas están estrictamente diferenciadas.

Otra estructura móvil nos ofrece un bonito ejemplo de la relación «o». Es prácticamente la misma disposición que la anterior, pero el tubo de desagüe que conduce al cuarto recipiente se encuentra en el fondo del tercero. Existe un rebosadero destinado a permitir la salida del agua sobrante. Ahora, en cambio, el recipiente inferior se llena también cuando sólo está lleno uno de los recipientes superiores (cf. figs. 15.12, 15.13).

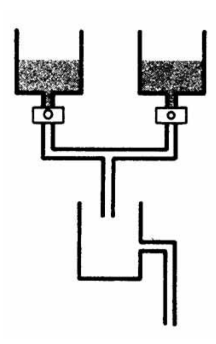


Fig. 15.12: así se concreta la relación «o». El recipiente inferior ya se llena si estaba lleno uno solo de los recipientes superiores.

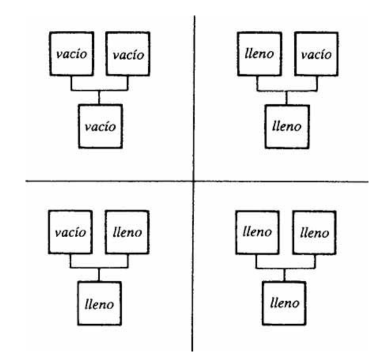


Fig. 15.13: este esquema explica las diversas posibilidades de la figura 15.12.

La lógica matemática muestra que todas las concatenaciones lógicas pueden representarse con muy pocos pasos elementales, como «y, o, sí, no». Pero no queremos detenernos demasiado en estas cuestiones abstractas, sino ver cómo pueden emplearse esas concatenaciones lógicas para cálculos prácticos, concretamente numéricos. Para ello tendremos que descender al mundo subterráneo de la computadora, que para el lego es simultáneamente un mundo mágico.

Las matemáticas enseñan que todos los números pueden expresarse mediante las cifras cero y uno (el llamado sistema binario). El sistema binario también permite reproducir las reglas de cálculo entre todos los números como reglas de suma, resta y multiplicación de números.

Con sorpresa, comprobamos así que las diversas partes de una computadora se comunican por medio de una suerte de lenguaje primitivo. Las señales de las computadoras están formadas únicamente por ceros y unos. La concatenación lógica «y» nos permite ver de inmediato de qué manera una computadora puede multiplicar estos números cero y uno. Veamos cómo procede la computadora para multiplicar, a fin de constatar si lo hace correctamente. Para ello deberemos comprobar si obtiene los mismos resultados que se obtienen normalmente. Cualquier escolar sabe que 0×0 = 0; 0×1 = 0; 1×0 = 0; y 1×1 = 1. Nuestra computadora de agua puede imitar exactamente estas reglas. Un recipiente lleno significará 1; uno vacío, O.

Si dejamos vacíos ambos recipientes superiores, también seguirá vacío el inferior (cuarto, fig. 15.11), que es el que indica el resultado final. Así habremos comprobado que la computadora cumple la regla 0×0 = 0. Si llenamos uno solo de los recipientes superiores, el inferior también seguirá vacío. Vemos confirmado el cumplimiento de la regla 0×1 = 0. Si llenamos ambos recipientes superiores, finalmente también se llenará el inferior. Así se verifica la regla 1×1 = 1. Así queda explicada la tabla de multiplicar, por así decirlo, de la computadora.

Con la ayuda de estas estructuras móviles con agua también podemos verificar otras reglas de cálculo; por ejemplo, la suma. En este caso los circuitos del agua son un poco más complejos. Remitimos al lector interesado en estas cuestiones a las figuras 15.14 a y b. Sobre la base de tales dispositivos podemos convencernos muy rápidamente de que la computadora puede concretar todos los pasos del cálculo por medio de unos dispositivos muy simples.

La idea de ilustrar el funcionamiento de una computadora con juegos de agua puede parecer un poco peregrina. Pero realmente hay fábricas de calculadoras que tienen pequeñas computadoras en forma de tales dispositivos hidráulicos.

A la vez, el ejemplo de la figura 15.14 nos muestra que incluso la sencilla operación «y» requiere una conexión relativamente compleja de los tubos de agua. Si ahora quisiéramos poner en práctica unas multiplicaciones, divisiones u otras reglas de cálculo tan sólo un poco más complejas, los circuitos hidráulicos de la computadora llenarían rápidamente un rascacielos. Nada más natural, pues, que preguntar a los físicos y electrotécnicos si no se podría construir otros circuitos de esta índole, pero cuyas dimensiones fueran mucho menores. Cuando se requiere una inmensa cantidad de elementos y, con ello, muchos cálculos parciales, debe procurarse, además, que los diferentes pasos ocupen muy poco tiempo. Felizmente los físicos descubrieron hace tiempo que los circuitos no deben basarse forzosamente en construcciones hidráulicas. Al comienzo de este libro hablábamos de los electrones, aquellas partículas mínimas que transportan la corriente eléctrica en los metales. Estas partículas no sólo pueden ser transportadas, sino también almacenadas; todos conocemos, por ejemplo, las baterías y los condensadores.

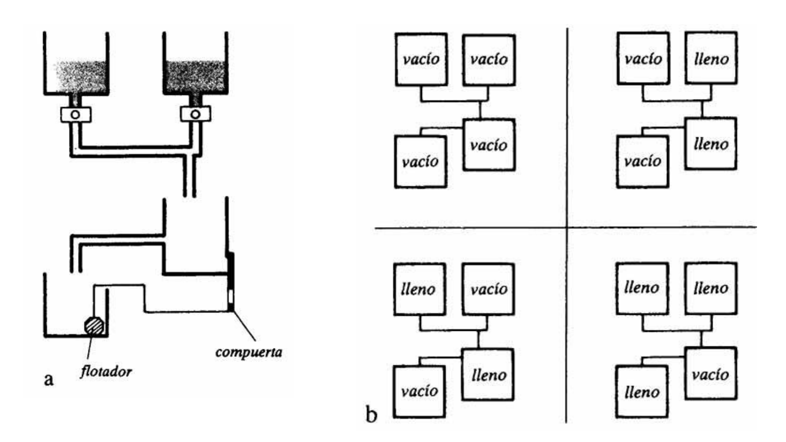


Fig. 15.14: un circuito hidráulico para la suma

a) este «juego de agua» nos muestra cómo puede realizarse el proceso matemático de la suma mediante una disposición de esta índole. Un recipiente superior lleno representa un 1; uno vacío, un 0. El llenado resultante de los recipientes inferiores representa los números en el llamado sistema dual (también llamado binario). En adelante sólo hablaremos de estos dos recipientes.

Si ambos recipientes están vacíos, esto representa el cero. Si está vacío el recipiente izquierdo y lleno el derecho, ello representa un uno. El recipiente izquierdo, lleno, y el izquierdo, vacío, representan un 10 en el sistema binario. En el sistema decimal habitual este número corresponde al 2.

Sobre la base de la figura 15.14b queremos aclarar ahora cómo se cumplen las reglas de la suma con el dispositivo de la figura 15.14a.

Si ambos recipientes superiores están vacíos es que queremos sumar 0 más 0. Entonces naturalmente también estarán vacíos ambos recipientes inferiores. Si está vacío el recipiente superior izquierdo y lleno el superior derecho, cuando abramos los grifos de ambos recipientes se llenará sólo el recipiente inferior derecho; el izquierdo, en cambio, seguirá vacío. Esto se corresponde con el resultado de la suma, es decir, 1. La misma consideración vale, desde luego, para el caso en que sólo esté lleno el recipiente superior izquierdo.

Es esencialmente interesante el caso en que ambos recipientes superiores están llenos, es decir que queremos sumar 1 más 1. Si vaciamos en primer término uno de los recipientes superiores, por de pronto se llenará el recipiente inferior derecho. Agregando el contenido del otro recipiente superior, el inferior derecho rebosa y llena el inferior izquierdo. El flotador instalado en éste hace subir la compuerta.

Con ello se vaciará el recipiente inferior derecho y obtendremos el resultado indicado en el esquema inferior derecho de la figura 15.14b, que corresponde precisamente a la representación del 2 en el sistema binario. Este circuito está, pues, efectivamente en condiciones de realizar una suma en el sistema binario. Mediante combinaciones adecuadas de tales circuitos también pueden sumarse números más complicados que el cero o el uno. Pero el principio fundamental seguirá siendo el mismo.

b) los pasos lógicos del circuito a).

Igual que, en el ejemplo del agua, ésta fluía de un recipiente al otro a raíz de la fuerza de la gravedad, también podemos transportar los electrones de un recipiente, un condensador, por ejemplo, al siguiente, si les hacemos «rodar cuesta abajo» mediante una caída de tensión. Esta analogía entre el agua y los electrones permite que los ingenieros pueden reproducir electrónicamente todos los circuitos antes señalados.

Durante los últimos años la técnica ha realizado verdaderos milagros en la construcción de circuitos cada vez más pequeños. En los años sesenta las computadoras todavía estaban equipadas con válvulas de radio, de aspecto y tamaño parecidos a las bombillas de luz, cada una de las cuales ejecutaba una sola función de conexión (de manera similar a nuestro elemento de construcción del dispositivo hidráulico). Con sus 18.000 válvulas, la computadora americana Eniac pesaba dieciocho toneladas y su coste era de más de noventa millones de pesetas. Actualmente, decenas de miles de elementos de construcción, cada uno con la función de una antigua válvula de radio, se hallan reunidas en placas sumamente delgadas y de un centímetro de diámetro, con un coste de seiscientas pesetas. Continuamente se han ido y se siguen poniendo en práctica nuevas ideas. Al mismo tiempo se rebaja constantemente el tiempo de conexión. En la actualidad, éste se sitúa en el orden de la cienmillonésima de segundo.

Después de las válvulas hicieron su entrada los elementos semiconductores, los llamados transistores, y no sólo en las radios y los televisores sino también en la técnica de las computadoras. Actualmente está naciendo una nueva generación de computadoras basadas en circuitos hiperconductores (los llamados *Josephson-junctions,* un término técnico inglés). Estas computadoras suelen ser casi tan pequeñas como una caja de cigarros, pero para que estén en condiciones de funcionamiento deben conservarse en cá-

maras frigoríficas de baja temperatura (cercana al cero absoluto). Si se calientan tan sólo unos pocos grados pierden su capacidad de memoria y «razonamiento», que es muy superior a la de las computadoras actuales.

Procesos lógicos independientes de su soporte material

En este punto vuelve a intervenir la sinergética. En el curso de este libro hemos encontrado repetidas veces el concepto «ordenador». Según muestra la sinergética, los ordenadores de los que hablamos están sometidos ellos mismos a procesos lógicos. En los casos que acabamos de describir, la densidad de los electrones en las distintas partes de un elemento de construcción es un ordenador: caracteriza el estado macroscópico. Mediante circuitos hemos logrado que estos ordenadores interactúen y generen otros ordenadores. Lo interesante de los resultados de la sinergética consiste en que estos procesos de conexión entre ordenadores pueden llevarse a cabo de muy diferentes maneras; a menudo incluso puede realizarlos un solo sistema sin que tengamos que instalar nosotros mismos el circuito correspondiente. En la actualidad los circuitos de computadoras también pueden ser ejecutados por la luz láser; hay perspectivas de llegar a lograr tiempos de conexión de una billonésima de segundo, es decir, la diezmilésima parte de los actuales, que ya son increíblemente breves. Estas conexiones también se pueden obtener mediante reacciones químicas. Todo ello resulta especialmente importante cuando buscamos elementos para computadoras aún más pequeños que los actuales. Con ello empezamos a acercarnos a las dimensiones de los propios átomos y moléculas.

La misma naturaleza nos ofrece aquí el modelo de un elemento de computadora pequeñísimo, posiblemente el más pequeño imaginable. Se trata de membranas que están presentes en las células y en especial también en las neuronas. Estas membranas están formadas por moléculas oblongas, cada una de las cuales tiene una especie de cabeza y de cola: una de las partes se estira en dirección hacia una envoltura de agua que la rodea, mientras que la otra se aparta del agua. Su común rechazo del agua obliga a las moléculas a enderezarse y alinearse como soldados (fig. 15.15). Estas membranas también pueden crearse artificialmente y tienen un grosor igual al largo de una sola molécula. Por acción de otras moléculas determinadas, pueden abrirse o cerrarse poros en este tipo de membrana, permitiendo así

el paso de átomos eléctricamente cargados o de otras moléculas según ciertas normas (fig. 15.16). De este modo se forman elementos de conexión que pueden desempeñar funciones lógicas. Seguramente no pasará mucho tiempo antes que el hombre logre construir elementos de computadora, y quizás incluso computadoras enteras, de estas dimensiones atómicas.

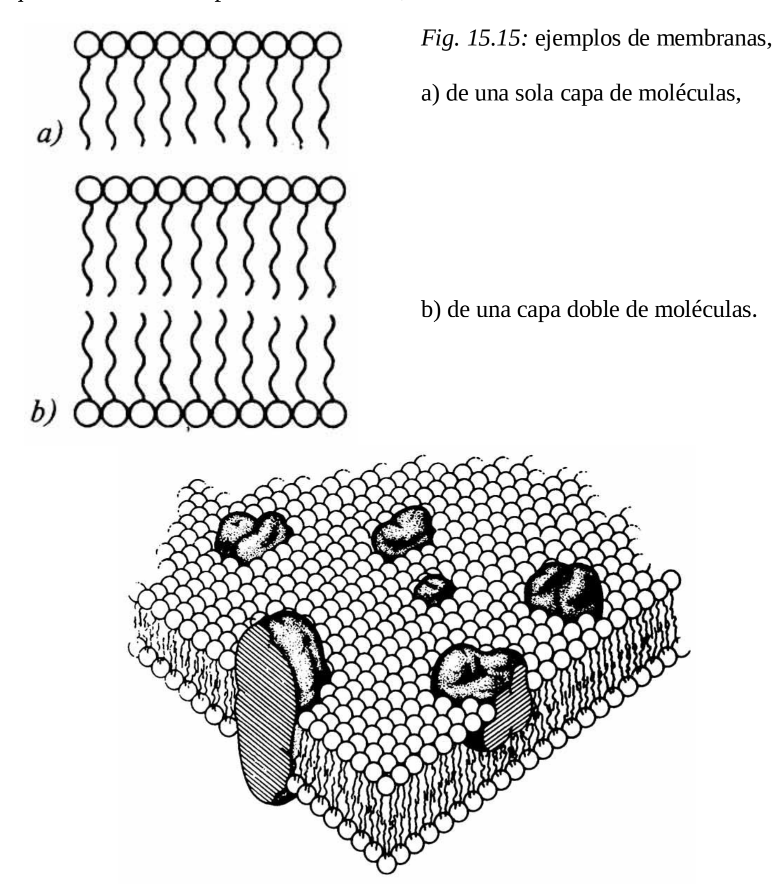


Fig. 15.15: ejemplos de membranas,

a) de una sola capa de moléculas,

b) de una capa doble de moléculas.

Fig. 15.16: representación gráfica de una biomembrana con moléculas incorporadas.

Los procesos de ordenamiento en este plano microscópico satisfacen las normas de la sinergética. Se trata casi exclusivamente de resultados que sólo tienen lugar gracias a la acción de conjunto de muchas partes individuales. Con ello se abren unas perspectivas fascinantes: reconocemos que los procesos lógicos, los razonamientos en última instancia, pueden desarrollarse sobre la base de sustratos materiales de muy distinta naturaleza. El soporte pueden ser el agua o los electrones, pero también ciertos fenómenos químicos, el láser o moléculas biológicas.

Con estas consideraciones hemos descendido al mundo subterráneo de la computadora, hemos dilucidado los elementos que lo componen. Pero no debemos caer en el error de suponer que todos los procesos del pensamiento deban estar vinculados a pequeños elementos lógicos de este tipo. Quizás existan otras posibilidades de desarrollo de los procesos de pensamiento, de las que hoy día aún no tenemos noción alguna; por ejemplo, procesos que no puedan descomponerse en pequeñísimos pasos elementales.

¿Pueden ser caprichosas las computadoras?

Las computadoras nos parecen máquinas muertas que proceden de manera estrictamente programada: no hay lugar para la libertad o la indeterminación. No obstante, a lo largo de este libro hemos encontrado problemas que no poseen una solución unívoca. Por ejemplo, en el caso de la ruptura de la simetría, de la bola en el recipiente con dos huecos, ¿hacia dónde se dirigirá la bola? O en el caso de la doble percepción: jarrón o rostros, ¿qué percibimos? Ante este tipo de tareas, la computadora no sabe qué hacer. Para resolver el problema debe apelarse al azar. Para que la computadora siga calculando o solucionando problemas es preciso impulsarla con algunas fluctuaciones al azar.

Los caprichos de la computadora están programados. Pero incluso si no los programamos intencionadamente, sus soluciones pueden parecemos caprichosas. Esto es especialmente probable en el caso de procesos complicados que se correspondan con los de la esfera psicológica, donde ciertamente las situaciones conflictivas se presentan en sucesión ininterrumpida.

Con lo cual llegamos también al problema de hasta qué punto puede efectuar razonamientos superiores una computadora. El ejemplo del reconocimiento de frases ya nos ha demostrado que el grado de dificultad aumenta enormemente en cuanto ascendemos un solo escalón en la jerarquía letra/palabra/significado-de-una-oración. La computadora aún parece irle muy a la zaga al hombre en cuanto a la capacidad de establecer conexiones transversales o, en otras palabras, asociaciones. Pero tampoco en este tema debe excluirse la posibilidad de que un día la computadora supere al cerebro humano, tanto en la cantidad de material elaborable como en la manera de elaborarlo. Por ahora, sin embargo, no cabe ni pensar en ello, y nada significa en ese sentido el hecho de que ya exista una moderna rama de la investigación llamada *artificial intelligence*, inteligencia artificial. Pero demos rienda suelta a nuestra fantasía. Ciertas computadoras ya saben hablar, en cierta medida, y algunas pueden reconocer, dentro de determinados límites, palabras u oraciones simples habladas. ¿Hasta dónde podrá llegar la similitud entre la computadora y el ser humano? ¿Aquélla podría tener sentimientos? ¿Y una conciencia? Estas cuestiones trascienden el ámbito de la sinergética, que es una disciplina predominantemente orientada hacia las ciencias naturales. De todas maneras podemos exponer aquí algunas ideas, destinadas más a ofrecer sugerencias al lector que a dar respuestas acabadas.

¿Por qué podemos hablar de sentimientos los seres humanos? Por una parte, porque los experimentamos nosotros mismos; por la otra, porque podemos comunicarlos y, en cierto sentido, describírselos a nuestros congéneres. Esta capacidad de comunicar sentimientos se basa naturalmente en el hecho de que las demás personas disponen de sentimientos parecidos; en caso contrario jamás entenderían qué es un sentimiento. Aquí ya partimos de un supuesto, precisamente el de que los sentimientos que experimentan los distintos seres humanos son iguales o, cuanto menos, parecidos. Nunca estaremos en condiciones de comprobarlo por alguna vía objetiva. Es una suposición muy verosímil pero no verificable.

Antes de preguntarnos si una computadora tiene sentimientos deberíamos plantearnos qué ocurre en la naturaleza animada. Seguramente concederemos que todos los animales superiores tienen sentimientos, aunque no tan marcados como los humanos. En especial, por ejemplo, el sentimiento

de dolor. Muy distinto es el caso de las plantas. Talamos árboles, arrancamos flores o segamos cereales, sin plantearnos jamás los sentimientos de estos seres vivientes. Uno de los motivos es, sin duda, el hecho de que las plantas no pueden comunicarse con nosotros. Un animal puede hacerlo emitiendo sonidos, huyendo o mordiendo, esto es, reaccionando.

Por consiguiente, en realidad sólo podemos hablar de sentimientos cuando tenemos ante nosotros a un ser de la misma especie y existe la posibilidad de comunicación mutua. ¿Significa esto que las computadoras serán cada vez más antropomorfas? Ya ahora se puede construir con medios relativamente simples una computadora que simule sentimientos. Basta incluir una conexión que haga lo siguiente: cuando algún elemento esté sobrecargado, la computadora dirá «me duele esto o aquello». Actualmente es posible conseguirlo sin problemas. Pero, ¿significaría eso que la computadora realmente siente el dolor? Seguramente todos exclamaríamos al unísono: ¡no! La manifestación ha sido artificialmente introducida por la mano del hombre; la computadora sigue siendo una estructura muerta.

Pero, ¿qué ocurriría en el caso de computadoras capaces de auto- programarse y de aprender del contacto con su entorno? Entonces podría existir, por ejemplo, una computadora de diagnósticos, que recibiría del paciente las palabras «dolor» o «doler», o eventualmente también «alegría». De ahí a que la computadora reconozca las conexiones y emplee la palabra «dolor» en el caso de que falle o esté sobrecargado uno de sus elementos, media sólo un paso. Pero ¿estará verdaderamente dolorida?

Como vemos, la frontera entre hombre y máquina puede llegar a difuminarse, y en un futuro no demasiado lejano quizás habrá leyes del robot o leyes en defensa de los robots, igual que actualmente existen los derechos humanos. Tal vez los hombres incluso respetarán más las leyes de los robots que los propios derechos humanos (¡los robots son caros!). En estos momentos todo esto puede parecer utópico, pero es posible imaginar una época en que estas cuestiones serán muy debatidas, precisamente cuando las computadoras se parezcan aún más a los seres humanos. No debemos olvidar que ya existen computadoras tan sorprendentes para los no iniciados que éstos incluso acuden a ellas con sus dificultades morales. Pienso en la computadora Eliza, construida por Weizenbaum, que formulaba preguntas a los pacientes y a la cual acabó confesándose también la secretaria de Weizenbaum, según pudo observar éste. El truco de la computadora era

en realidad muy simple. Si uno de sus usuarios (para no decir «pacientes») decía, por ejemplo: «tengo problemas con mi padre», la computadora estaba programada para contestar: «cuénteme más cosas sobre su padre». El truco esencial de la programación consistía en motivar al paciente para que hablara más sobre sí mismo. Esa computadora causó tal impresión que algunos psicoterapeutas incluso evaluaron la posibilidad de incluirla en su práctica terapéutica. En cambio su padre, Weizenbaum, jamás ha pensado nada parecido y, por el contrario, estima peligroso confiar a las computadoras unas tareas que deben reservarse al discernimiento humano. La más inteligente de las computadoras no puede sustituir criterios éticos. Sería necio e irresponsable dejar en manos de una computadora las decisiones de amplio alcance moral o ético, como, en un caso extremo, la guerra y la paz.

No debemos renunciar a pensar por nosotros mismos

Pero también en otros casos debe procederse con mucha prudencia. Continuamente se nos habla de modelos del mundo, de cálculos de computadoras que nos pronostican la evolución de la economía en los próximos cincuenta o cien años. Pienso aquí en los modelos universales de Forrester y su grupo o en los estudios del Club de Roma, en los cálculos sobre el problema energético mundial, y muchos otros estudios. A mi juicio, el valor de tales estudios reside en que nos obligan a tomar conciencia de que nuestros recursos son limitados y que algunas fuentes de energía incluso pueden agotarse dentro de poco tiempo. Pero, por otra parte, como demuestra la sinergética, precisamente los sistemas complejos, caen de una inestabilidad en la siguiente. La consecuencia es que los resultados de los cálculos informáticos pueden depender en alto grado de unos factores que al principio habríamos rechazado como intrascendentes. Una pequeña inseguridad en los datos sobre la distribución de materias primas, los ciclos de fabricación, los reciclajes, etc., pueden traducirse en unos resultados finales completamente distintos, como hemos podido ver con toda claridad, sobre la base de ejemplos muy simples, en el capítulo dedicado al caos. Por ello a menudo es más importante que las computadoras no reciban ingentes cantidades de datos y los elaboren de una manera que ya queda fuera de nuestro alcance, y que en cambio tengamos cualitativamente claros a priori los diversos pasos. Para lo cual es importante desarrollar un «sentido» de cuáles

son las «magnitudes pertinentes». Sin duda, primero debemos abordar a tientas la solución de problemas complejos; aplicadas racionalmente, las computadoras pueden transformarse entonces en un auxiliar esencial. Pero, pese a todas las planificaciones y todos los cálculos previos, debemos contar con que el futuro nos deparará sorpresas, agradables unas y desagradables las otras.

XVI. LA DINÁMICA DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO, O LA LUCHA DE LOS CIENTÍFICOS

En la escuela tenemos, sin duda, nuestro primer contacto con la ciencia, a través de diversas asignaturas, como la historia, la geografía, la biología, las matemáticas o la física, por citar sólo algunas de ellas. La ciencia se nos aparece entonces como algo inconmovible y creado en tiempos remotos. Los jóvenes con espíritu explorador se sienten frustrados porque todo parece estar ya descubierto e investigado, y explorado hasta el último rincón de la Tierra.

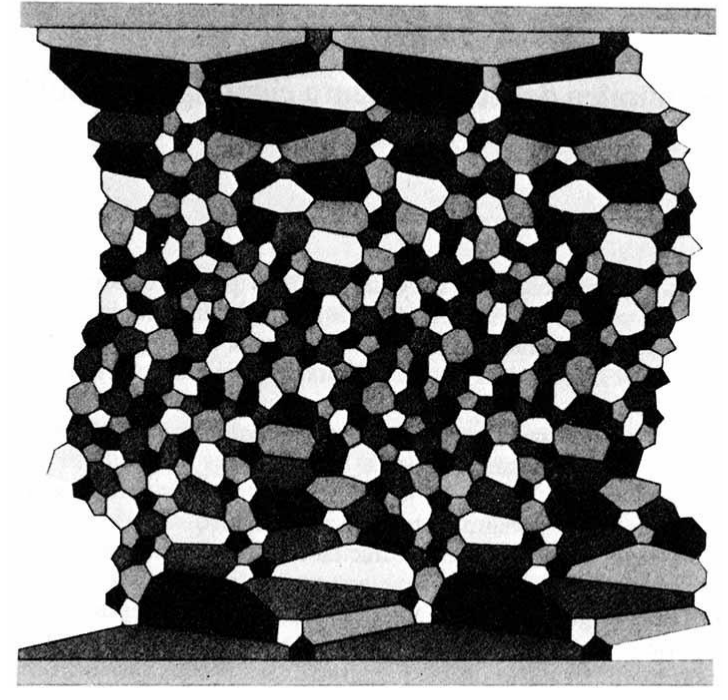


Fig. 16.1: ejemplo del problema de los cuatro colores en un mapa. Los cuatro colores aquí están representados con el blanco, el negro, el gris claro y el gris oscuro.

Pero, al mismo tiempo, de vez en cuando tenemos noticia de algún descubrimiento o invento completamente nuevo. Se descubre una nueva estrella cuya luminosidad fluctúa irregularmente, se demuestra la existencia de nuevas partículas elementales llamadas gluones, se consigue taladrar gruesas planchas de acero con la fuente luminosa llamada láser o, en matemáticas, se resuelve el centenario problema de los cuatro colores. Este problema parecía tan sencillo que incluso profanos intentaron repetidas veces hallar su solución. Pero sus esfuerzos resultaron tan vanos como los de los calificados matemáticos. En pocas palabras: cuando se confeccionan mapas, los países que tienen fronteras comunes se representan con colores distintos (fig. 16.1). Si un mapa contiene muchos países podría pensarse que para su impresión se necesitan muchos colores. Pero en el siglo pasado los impresores descubrieron, experimentalmente, que para cualquier mapa basta con cuatro colores. Para los matemáticos se plantea entonces la pregunta de si cuatro colores son suficientes para cualquier mapa imaginable o si cabría imaginar uno para el cual se precisaran más de cuatro colores; por ejemplo, cinco. Transcurrido más de un siglo desde la demostración experimental, Kenneth Appel y Wolfgang Haken lograron resolver finalmente el problema, hace sólo unos pocos años, mediante una computadora programada de manera que pudiera ejecutar ella misma gran cantidad de detalles de la demostración.

En todos estos ejemplos y en muchos otros la ciencia se nos presenta bajo un aspecto distinto. A menudo grandes descubridores o investigadores individuales modifican nuestra imagen del mundo. En este siglo, Einstein desarrolló la teoría de la relatividad y revolucionó así nuestras concepciones del tiempo y el espacio. Heisenberg y Schrödinger crearon la teoría cuántica, que nos proporcionó una visión totalmente diferente del mundo de los átomos. Crick y Watson descubrieron la doble hélice como portadora de la información hereditaria. Cuando uno estudia, y luego al llegar a ser también un científico, se siente abrumado por el torrente de publicaciones científicas. De todas partes nos llegan constantemente nuevos descubrimientos y conocimientos; diariamente aparecen en el mundo diecisiete mil publicaciones. Si a primera vista la ciencia parece algo estático y en reposo, pronto nos damos cuenta de que se mueve a un ritmo vertiginoso y se halla —para decirlo de manera más positiva— en constante evolución, en un desarrollo progresivo.

En este punto vuelven a cobrar peso ciertas consideraciones que son habituales en la sinergética. En los más diversos fenómenos que hemos investigado hasta ahora en este libro hemos comprobado que, cuando varían las influencias exteriores, en ciertas etapas de su evolución los sistemas van desarrollándose de modo más o menos regular. En determinadas situaciones, en cambio, se presenta un estado de orden macroscópico completamente nuevo. Ahora bien, la concepción que describe el conocido historiador de la ciencia Thomas S. Kuhn en su libro *Scientific Revolutions* («Revoluciones científicas») encaja perfectamente con esta imagen general trazada por la sinergética. Kuhn hace una distinción entre la ciencia normal y las revoluciones científicas. La ciencia normal también sigue desarrollándose, pero paso a paso. Amplía y profundiza los conocimientos adquiridos. A la construcción de puentes, por ejemplo, se aplican conocidas leyes físicas sobre cuya base se desarrollan construcciones de puentes novedosas. Tal vez no sea nada fundamentalmente nuevo, pero de todos modos se trata de un progreso de la ciencia y la técnica. También se llevan a cabo experimentos físicos; por ejemplo, para medir con mayor precisión la velocidad de la luz. En biología se sigue investigando cómo son transportadas las cargas eléctricas a través de las membranas celulares.

Pero a veces estas investigaciones conducen a la obtención de conocimientos enteramente nuevos. A fines del siglo xix, por ejemplo, se fueron acumulando los indicios de que las leyes de la mecánica no eran aplicables al movimiento de los electrones en los átomos. No podía haber, por ejemplo, átomos estables; los electrones que giraban alrededor del núcleo atómico tenían que acabar cayendo e incorporándose a éste. Por tanto, cada vez eran más numerosos los indicios de que las antiguas leyes no eran correctas, o sólo eran válidas dentro de ciertos límites.

Desde el punto de vista de la sinergética, la ciencia aparece como un sistema abierto. Se la alimenta constantemente con nuevos descubrimientos e ideas. Los nuevos descubrimientos pueden ser tan decisivos que conmuevan la antigua concepción de la respectiva rama de las ciencias naturales. Los científicos se sienten inseguros. En términos de la sinergética, aparecen fluctuaciones cada vez más fuertes, en forma de nuevas ideas o nuevas experiencias que encuentran adeptos y así se van fortaleciendo, aunque luego puedan ser refutadas, hasta que finalmente surge una idea nueva capaz de

explicar numerosos fenómenos y que, por tanto, definitivamente es aceptada por los científicos.

Una nueva idea científica, como por ejemplo la ya mencionada teoría cuántica, provocó una revolución científica en el sentido de Thomas S. Kuhn. En términos sinergéticos, esta nueva idea que reúne muchos cabos anteriormente sueltos es el «ordenador». Este ordenador, que en la obra de Kuhn recibe el nombre de paradigma, tiene todas las características de los demás ordenadores sinergéticos. «Esclaviza» los trabajos ulteriores de los científicos, quienes amplían y profundizan la nueva dirección de la ciencia en el sentido de esta idea, con lo cual vuelven a dedicarse a la ciencia «normal». Recíprocamente, a través de sus trabajos, los científicos siguen sustentando la nueva idea, el nuevo paradigma, posibilitando así la existencia del ordenador. El paso de un estado de conciencia de la ciencia al siguiente es como una transición de fase. La nueva idea, el nuevo principio fundamental o paradigma han provocado un amplio orden en el pensamiento.

Estos ordenadores pueden ser incorporados a partir de descubrimientos en cierto modo externos a la ciencia. Pero también pueden surgir y decaer como modas, paralelamente al espíritu general de la época. Es difícil negar la relación existente entre las concepciones científicas y las demás corrientes espirituales de una época. No en vano ha habido profundas discusiones entre concepciones religiosas o filosóficas, por una parte, y conocimientos científicos, por la otra.

Por la sinergética sabemos que un ordenador «esclaviza» los diversos subsistemas, que en nuestro caso son los distintos científicos. Esto ocurre precisamente en la ciencia. Una rama científica determinada sólo puede existir como tal si la reconoce al menos un número considerable de científicos. La rama científica crea su propio lenguaje, que es común a todos los científicos que trabajan en ella. Un extraño —incluso un científico dedicado a *otra* disciplina— prácticamente no podrá comprender ese lenguaje, trátese de medicina, informática o matemáticas. De esta manera se estabiliza esa rama particular del saber. Sus ideas fundamentales parecen tan estables como si se hubiesen congelado. La generación siguiente las acepta, al menos en parte, sin cuestionárselas en absoluto.

Esta situación precisamente plantea una grave dificultad a los científicos jóvenes, para quienes es relativamente fácil publicar sus trabajos en

revistas especializadas siempre y cuando no trasciendan el marco convencional. Publicar ideas nuevas, no convencionales, y encontrar seguidores es, en cambio, muy difícil. El científico joven se encuentra, por tanto, en un auténtico dilema. Para perfilarse, destacarse, lograr el reconocimiento general, debería tener y publicar ideas completamente nuevas y no convencionales. Pero precisamente en ese caso el consejo de redacción de las revistas, que evalúa todos los trabajos presentados y decide su aceptación o rechazo, vetará la publicación de la novedad, dado que sus componentes pertenecen a la «vieja» corriente de pensamiento. Naturalmente hay excepciones, pero en física se requirió el genio de un Max Planck para reconocer en Einstein a un genio y allanarle el camino.

Desde luego, he exagerado un poco este problema de la imposición de una nueva idea. Incluso en su funcionamiento normal resulta muy difícil impulsar la ciencia, y sólo pocas veces le es dado a un científico tener una idea nueva realmente fundamental y poder imponerla. Pero entonces suele ocurrir lo mismo que en otros sistemas sinergéticos. Los tiempos estaban maduros para esa idea nueva, de manera que, una vez formulada, se impone rápidamente. Esta «madurez» también suele manifestarse a través del hecho de que varios científicos formulen simultáneamente las mismas ideas de manera independiente.

Aunque siempre haya algunos científicos que se destaquen en solitario, la ciencia es una empresa colectiva. Los conocimientos del individuo pasan a ser sustentados por la totalidad de los científicos y, más adelante, incluso por sus alumnos y estudiantes. Recíprocamente, la obra de los científicos individuales se basa en la de las generaciones anteriores. Este comportamiento colectivo permite que de la ciencia se ocupe una nueva disciplina, la sociología de la ciencia. Uno de sus creadores, Robert Merton, describe este mundo de relaciones sociológicas en la ciencia de manera científica pero a la vez humanamente emocionante. Dos factores que atraviesan como un hilo conductor los distintos capítulos de su libro: la lucha de los científicos por la prioridad y el «efecto de san Mateo». Como ya hemos dicho, un descubrimiento frecuentemente no es obra de un solo científico. A menudo se establece una fuerte lucha competitiva entre varios científicos para ver quién realiza el primero el descubrimiento nuevo y fundamental. La historia está llena de descubrimientos prácticamente simultáneos. El

cálculo infinitesimal, por ejemplo, fue inventado por Newton, y casi simultánea e independientemente de él, por Leibniz. En biología, Darwin y Wallace formularon al mismo tiempo los principios fundamentales de la teoría de la evolución. Mientras que Darwin y Wallace se trataron con cordialidad, Newton mantuvo un duro combate, afirmando que Leibniz le había robado sus ideas. El famoso Newton fue también quien finalmente tuvo que confesar que su concepto de fuerza provenía originalmente de su compatriota Hooke. Recordemos en ese sentido las palabras de Rousseau ya citadas en la página 164.

¿Cuáles son las fuerzas impulsoras del científico y cómo contribuye la sinergética al esclarecimiento de la formación de los conocimientos científicos?

Igual que cualquier otra persona, el científico debe ganarse su sustento. Pero las motivaciones decisivas deben de ser otras, tan bellamente resumidas en un epígrafe de *The Scientific Elite* (Nueva York, 1977) de Harriet Zuckerman. El epígrafe, una cita de Simone Weil, reza así: «La ciencia debe buscar hoy en día una fuente de inspiración superior a ella misma, o sucumbirá. Existen exactamente tres motivos para dedicarse a la ciencia: 1) las aplicaciones técnicas; 2) el juego del ajedrez; 3) el camino hacia Dios. (El ajedrez está adornado con campeonatos, premios y medallas).»

En la actualidad probablemente no hablaríamos sólo de aplicaciones técnicas sino de aplicaciones en general. Últimamente se ha escrito tanto sobre la importancia social de la investigación que tocaré sólo brevemente este tema al final.

El último punto, el camino hacia Dios, también es bien conocido: la búsqueda de la verdad, de aquello que «mantiene íntimamente unido al mundo».

Pero, ¿qué significa el segundo punto, el del «juego del ajedrez»? Es la ciencia como reto intelectual, ya sea para arrancarle un nuevo secreto a la naturaleza, ya —y especialmente— por mor de la lucha competitiva entre los sabios, por la alegría de ser el «primero» u obtener el reconocimiento científico, lo cual puede traducirse exterior- mente en premios y medallas. Entre los científicos hay desafíos intelectuales iguales a los de los maestros del ajedrez que luchan por el primer puesto. La lucha de los científicos por el reconocimiento científico significa en última instancia una lucha por

prioridades. ¿Quién ha hecho el descubrimiento primero? ¿Quién ha publicado primero cierta idea? Pese a que en la era del trabajo en equipo esta postura muchas veces parezca absurda, no podemos dejar de constatar que la lucha competitiva es cada vez más dura en la ciencia.

Aquí intervienen nuevamente los principios fundamentales de la sinergética. Hay muchos, muchísimos científicos, pero sus recursos y las posibilidades de descubrir algo realmente nuevo son limitados. Esto conduce a una exacerbación de la lucha competitiva y, en el sentido de muchos ejemplos que hemos ido viendo en el curso de este libro, se llega finalmente a la supervivencia del «mejor» en cada una de las disciplinas. Igual que en física sobrevive y vence en la competencia una sola onda láser, en la ciencia triunfa en cada campo un nombre, una obra. Ese nombre y esa obra se citan una y mil veces, penetran en la conciencia de los científicos y, finalmente, tal vez en la de amplios sectores de la población.

Todo esto puede parecer una analogía demasiado forzada con los demás terrenos de la sinergética. Pero es precisamente lo que Robert Merton denomina el efecto de san Mateo, el cual documenta con numerosos ejemplos.

Dice san Mateo en el Nuevo Testamento: «A todo el que tiene, se le dará y le sobrará; pero al que no tiene, aun lo que tiene se le quitará.» Cuando un nombre se destaca, los otros autores lo van citando cada vez más por los más diversos motivos, hasta que finalmente sólo queda ese nombre. Este efecto es realzado por los premios, sobre todo si se conocen públicamente. A causa del gran número de científicos es cada vez más frecuente que los nuevos resultados sean obtenidos simultánea e independientemente por varios. Si uno de ellos recibe entonces una distinción, hay una gran posibilidad de que finalmente sólo se le cite a él y que incluso se le adjudiquen inventos con los que ya nada tenga que ver. También debemos tener en cuenta que los comités que asignan los premios desarrollan una dinámica determinada. Si están formados por titulares de premios existe la tendencia a proponer el premio para otros científicos de la misma corriente de ideas. Habrá entonces una acumulación de premios en campos o «escuelas» muy similares. La obra de Harriet Zuckerman ofrece una variedad de ejemplos al respecto.

Resulta interesante ver que a veces los científicos intentan actuar contra esta presión de la competencia o aprovecharla en beneficio propio. Como hemos visto, para que un científico adquiera fama es importante que otros

autores utilicen sus resultados y citen sus trabajos. En Estados Unidos se publica una gran obra de consulta, el llamado *citation-index* o índice de citas. Esta obra funciona así: supongamos que el señor X ha publicado un trabajo. En el índice figurará entonces, año tras año, el nombre de los otros científicos que han citado al señor X. El *citation-index* permite deducir, por tanto, cuántas veces se ha citado a determinado científico. Naturalmente, el mero número de citas no es forzosamente una medida de la importancia del señor X. Podría haber publicado un trabajo sobre una problemática importante pero con una solución equivocada. En ese caso, muchos otros científicos habrán leído su trabajo y publicado la rectificación pertinente. Pero si prescindimos de tales casos límite, el *citation-index* da de todas maneras un indicio sobre la influencia de un investigador sobre sus colegas. Incluso se afirma que algunas empresas y universidades norteamericanas pagan a sus colaboradores en función de su importancia en dicho índice. Los que son citados a menudo pueden contar con un salario más alto que los demás.

Pero volvamos al tema de lo que hacen algunos científicos para escapar de la presión de la competencia. Aunque se trate de casos aislados, que no caracterizan al grueso de la comunidad científica, éstos son muy interesantes desde el punto de vista sinergético. En efecto, según puede comprobarse sobre la base del *citation-index,* hay grupos de científicos, sobre todo en países grandes, que se citan exclusivamente entre ellos y nunca (o sólo rara vez) mencionan a otros grupos. De esta manera los miembros del «club» intentan aumentar su prestigio exterior.

En cierto sentido este comportamiento se parece al de los comerciantes que se concentran en un lugar, con lo cual pueden dejar fuera de combate a las tiendas aisladas y diseminadas, como veíamos en el capítulo 12. Pero si hay varios clubs de esta índole, la lucha competitiva entre los científicos queda reemplazada por la de sus clubs. A primera vista, la aparición de estos clubs puede parecer peligrosa para el desarrollo objetivo de la ciencia. Podría ocurrir que un club difundiera ideas erróneas. En efecto, esa posibilidad existe. Pero tampoco debemos subestimar la autocrítica de la ciencia, que tiene su origen en la lucha por la prioridad. Es precisamente un gran mérito poder demostrar la falsedad de una idea propagada hasta entonces. Aunque también es cierto que la formación de clubs o «escuelas» puede dificultar la imposición de nuevas ideas que difieran de las de aquellos clubs.

En tiempos pasados la penetración de una idea nueva podía convertirse indudablemente en una cuestión generacional. Mientras que los integrantes de una generación de científicos seguían discutiendo un problema, la generación siguiente se inclinaba por la solución que consideraba correcta y olvidaba la lucha anterior. Los tiempos actuales y, con ellos, la ciencia se han vuelto tan dinámicos que no es necesario un cambio generacional para la adopción de un paradigma nuevo.

¿A quién beneficia entonces finalmente toda esta lucha competitiva? La respuesta es sorprendente: beneficia únicamente a la humanidad y su futuro, en la medida en que utilice responsablemente los conocimientos obtenidos tras dura lucha. Al final, los puntos 2 y 3 del epígrafe antes citado le favorecen tanto como el punto 1.

La lucha competitiva de los científicos no es sino una competencia de rendimiento con objetivos fijados por ellos mismos. La ciencia es un sistema que se autoorganiza. Algunos aspectos de su evolución nos recuerdan las concepciones de los biólogos acerca del origen de la vida misma: unas moléculas orgánicas, por ejemplo, aminoácidos, formadas inicialmente por azar, van uniéndose en formaciones cada vez más grandes, hasta que repentinamente llegan a un estado ordenado tal que surge una nueva entidad de rango superior, significativa y de una cualidad totalmente nueva. En este sentido los conocimientos científicos se forman de manera más o menos fragmentaria, para unirse finalmente en un plano superior formando algo nuevo: un paradigma.

Pero, ¿no sería posible planificar la ciencia de manera sistemática en vez de confiar en esas «casualidades», en esos «fragmentos»? Con la ciencia ocurre algo similar a lo que pasa con nuestros pensamientos: no podemos obligarlos a que inventen o descubran tal o cual cosa de un día al otro. Nuestro éxito depende de numerosos factores, y no es el menos importante de ellos el que nuestros pensamientos fragmentarios se combinen correctamente y, en última instancia, de manera espontánea y autoorganizada. Es este hecho empíricamente comprobado el que tanto dificulta la planificación de la ciencia y la economía.

Pero podemos aprender algo de los sistemas naturales que se autoorganizan: conviene fijar y fomentar objetivos generales sin entrar en detalles y recordarles precisamente a los científicos jóvenes las conexiones globales. Conviene fomentar la cooperación, el intercambio de pareceres entre los

científicos y entre las diversas disciplinas. Las ideas de otras disciplinas a menudo resultan fructíferas y contribuyen a grandes avances en campos diferentes. Según me dijeron, Ford obtuvo su idea de la fabricación de automóviles en serie de la producción de maquinaria agrícola.

Pero al considerar todos esos influjos, no debe dejar de observarse que precisamente los científicos más destacados tienen una especie de «instinto» para detectar lo que es importante, pertinente y realizable. Y por eso resulta francamente frustrante que científicos menos avezados, o incluso personas ajenas a la ciencia, les estén diciendo continuamente qué es lo que en realidad deberían descubrir. En efecto, saber descubrir algo significa buscar en los sitios *prometedores,* y para ello se requiere mucha experiencia científica, buena suerte y el ya citado «instinto».

Si pudiésemos planificarlo todo y prever todos los descubrimientos e inventos, no necesitaríamos la ciencia. Pero la experiencia histórica demuestra que no es así. Algunas cosas ni siquiera se sospechaban, sino que se encontraron por pura casualidad, como por ejemplo los rayos X, pero luego los científicos comprendieron prontamente su importancia. Conclusiones para la política científica: se deben marcar las tendencias generales, pero dejando espacio para la autoorganización.

Una de las características de los sistemas que se autoorganizan es que también los objetivos tienen que reformularse y readecuarse una y otra vez a las nuevas circunstancias. En el caso de la ciencia (y de la técnica, que doy siempre por incluida en el término) esto sólo puede darse a través de un constante diálogo con la sociedad. Pues cada una de ellas, la ciencia y la sociedad, es condición necesaria para la existencia de la otra; se trata de una auténtica simbiosis que debe fomentarse siempre que sea posible. De un diálogo de esta índole se desprenderá el replanteamiento de los objetivos (eventualmente demasiado) generales; por ejemplo, «solucionad el problema energético» o «resolved el problema del cáncer». Algunos ejemplos de este libro nos mostraron que hay problemas que carecen de una solución única, y en el capítulo final nos ocuparemos de problemas que en principio no tienen solución alguna (lo cual no significa que esto se aplique a los recién citados problemas de la energía y el cáncer). Este diálogo es también cada vez más urgente en vista de la creciente hostilidad contra la ciencia y la técnica. A algunas personas estos campos les resultan tan amenazadores

porque la barrera del lenguaje científico ya no les permite reconocer globalmente la estructura de pensamiento, los objetivos y las consecuencias de la ciencia. Así va creciendo su sensación de ser manipuladas y arrolladas por la ciencia (y la técnica).

La lucha competitiva de las revistas

El principio de la competencia, tan comentado en este libro, tanto en física y economía como en sociología, no se aplica sólo a los científicos sino también, por ejemplo, a las revistas científicas. Para dar cuenta de nuevas disciplinas se fundan nuevas publicaciones; otras, mueren. También aquí cumplen un papel importante cuestiones como el prestigio científico y los problemas económicos. Gracias a las firmas de científicos importantes algunas revistas ganan mayor prestigio que otras. La consecuencia es que se les envían numerosos estudios que el consejo de redacción pueden seleccionar; al mismo tiempo aumentan su tirada y su difusión. Pero dado que las bibliotecas tienen unos recursos económicos limitados, el prestigio de unas revistas tiene que conducir forzosamente a la extinción de otras. Cuando estas últimas se compran menos, deben aumentar su precio para seguir siendo rentables. Pero esto no hace más que acelerar su desaparición, dado que las bibliotecas estarán aún menos dispuestas a adquirir esas revistas caras.

Un factor importante en la difusión de las revistas científicas, aunque a menudo no se lo tenga en cuenta, es también el idioma en que se publican. En tiempos pasados éste fue el latín; luego, en las ciencias naturales, el alemán; actualmente, el idioma universal de la ciencia es el inglés. En el paso del alemán al inglés hubo una «transición de fases» que puede localizarse exactamente en el tiempo; se produjo en la década de los años treinta, cuando muchos sabios alemanes emigraron a Estados Unidos y al Reino Unido, y comenzaron a publicarse en inglés.

Toda vez que los grandes países, como Estados Unidos, poseen un elevado número de lectores, sin contar los de las bibliotecas, sus revistas pueden publicarse y competir de manera más ventajosa y eficaz. Al mismo tiempo disponen de toda una serie de destacados científicos.

Esto lleva a que esas revistas tengan un papel protagonista en el mercado mundial, con lo cual simultáneamente están en vías de asumir el papel

de ordenadores en sentido sinergético. Esto implica una enorme exportación de ideas que —como piensan muchos científicos europeos— no refleja siempre con justicia los verdaderos logros científicos. No pocos méritos científicos europeos dejan de obtener así su valoración justa, y todo parece provenir finalmente de Estados Unidos.

La sinergética de la sinergética

La sinergética es una de las pocas disciplinas científicas cuyos principios pueden aplicarse a ella misma. Del mismo modo que en determinada ciencia puede formarse un nuevo paradigma sobre la base del cual unos procesos que antes parecían de diferente naturaleza pueden reconocerse como algo unitario, la sinergética permite representar desde un punto de vista unitario fenómenos radicalmente diversos que pertenecen a disciplinas completamente distintas. Cuando introduje este nuevo campo me pareció una empresa arriesgada, en la que uno podía perder su reputación científica. En aquel momento la afirmación de la existencia de normas generales como las que se exponen en este libro parecía una tesis temeraria. Pero pronto se vio que había llegado su momento, y la idea de la sinergética se ha impuesto ampliamente en la actualidad. La sinergética misma se ha convertido así en un ejemplo típico de la creación de una ciencia nueva.

Si comparamos la aparición de un paradigma nuevo, de una nueva idea fundamental, con una transición de fases físicas, surge la pregunta de si también en la esfera espiritual existen las «fluctuaciones críticas», es decir, fluctuaciones que acompañan el «nacimiento» de la nueva idea, o eventualmente lo anteceden, pero son finalmente absorbidas o desplazadas por ella. Estas tesis generales de la sinergética obtienen una confirmación sorprendente en el terreno de la sinergética como ciencia. En efecto, prácticamente al mismo tiempo que ella nacieron por lo menos otras dos concepciones que tienen por objeto una unificación de las ciencias en su totalidad.

Por una parte, está la teoría de las catástrofes, que en la opinión pública va ligada al nombre de René Thom, pero en cuyo desarrollo y aplicación colaboraron también sustancialmente otros matemáticos, como Christopher Zeeman, Tim Poston y V. I. Arnold. Probablemente no existe ninguna otra teoría matemática actual a la que le cuadren mejor las siguientes palabras

del *Wallenstein* de Schiller: «Confundido por el favor y el odio de las partes, su retrato moral se tambalea en la historia.» ¿Cómo es posible aplicar una expresión tan cargada de sentimientos a una teoría del claro y abstracto mundo de los razonamientos matemáticos? Para explicarlo debemos hacer un poco de historia.

Cuando la teoría de las catástrofes ya había adquirido gran renombre en los círculos matemáticos, la opinión pública empezó a prestarle atención a raíz de artículos de divulgación publicados en revistas ilustradas internacionales. En las ilustraciones que acompañaban el texto se veían catástrofes, casas destruidas por incendios o terremotos, trenes descarrilados, etc. ¿Había nacido la teoría que permitiría predecir esas catástrofes? Para contestar a esta pregunta tenemos que retroceder un poco más.

La teoría de las catástrofes se ocupa de cambios drásticos formulados mediante determinadas ecuaciones matemáticas; en este sentido se parece a la sinergética, en la que también los estados nuevos repentinamente formados ocupan el centro de las investigaciones. La teoría de las catástrofes permite analizar, por ejemplo, cómo se derrumba un puente sometido a una carga crítica (un resultado al que, por lo demás, ya habían llegado los ingenieros con independencia de la teoría en cuestión). Pero ahora viene el punto en que las opiniones están divorciadas. Cualquier teoría matemática, todo teorema matemático están vinculados a determinados postulados. En la escuela aprendemos, por ejemplo, que la suma de los ángulos de un triángulo es de 180 grados. Luego, en la universidad, pero también en parte en el ciclo superior de la enseñanza media, aprendemos que esa afirmación está vinculada a determinadas precondiciones, precisamente al cumplimiento de los axiomas de la geometría euclidiana. Si dibujamos un triángulo sobre una esfera, sobre un globo terráqueo por ejemplo, sus lados serán círculos máximos y la suma de los ángulos ya no será de ningún modo 180 grados. Algo análogo ocurre con la teoría de las catástrofes, pues está ligada a la llamada condición potencial, que no explicaré aquí porque resultaría demasiado técnico. Sin embargo, existen dos aspectos importantes para la valoración general, a los cuales nos referiremos.

Toda una serie de matemáticos estaban muy entusiasmados con la teoría de Thom porque casi podía desestimar la condición potencial; era, pues, una teoría muy «bella». Desde el punto de vista del especialista en ciencias naturales y del ingeniero, en cambio, la teoría de las catástrofes es inútil en

muchos campos, precisamente en los más importantes, como los sistemas abiertos, porque la condición potencial no se cumple en absoluto. Como se puede demostrar, en los sistemas abiertos la condición potencial no se cumple por principio o —para expresarlo de otro modo— en los sistemas abiertos, pero también en la mayoría de los cerrados, los fenómenos naturales se desarrollan siguiendo normas completamente distintas de las que postula la teoría de las catástrofes.

Tras el gran encomio prodigado a esa teoría, de pronto se la atacó con toda dureza. G. B. Kolata publicó un artículo titulado *«The Emperor has no clothes»*, el emperador está desnudo. Aludía al conocido cuento de hadas del sabio narrador danés Hans Christian Andersen (1805-1875). En este cuento se presentan ante el emperador unos extranjeros que pretenden saber tejer hermosas vestiduras con una cualidad especial: los tontos no pueden verlas. Los extranjeros comienzan a tejer; nadie ve las presuntas vestiduras, pero nadie se atreve a decirlo para no confesar su memez. Finalmente tiene lugar una gran procesión del emperador con sus nuevos «vestidos» que todos alaban por su belleza (lo cual es, dicho sea de paso, la aportación de Andersen al tema de la «opinión pública»). Al final, sin embargo, un niño exclama: el emperador está desnudo.

El ataque de G. B. Kolata y los de H. J. Sussmann y R. S. Zahler contra la teoría de las catástrofes provocaron a su vez una tempestad de indignación entre quienes la aplicaban, la cual se manifestó en numerosísimas cartas a la revista que había publicado el artículo de Kolata. En la actualidad se va imponiendo lentamente una reflexión más desapasionada al respecto; podemos observar también aquí la lenta desaparición de las fluctuaciones críticas tal como la conocemos por las transiciones de fase. Entre los científicos va prevaleciendo la conciencia colectiva o, en otros términos, el conocimiento científico de que la teoría de las catástrofes tiene sólo unas aplicaciones muy específicas. A esto se añade el hecho de que Thom niega por completo la existencia de fluctuaciones. Cuando Thom expresó este parecer en uno de los simposios sobre sinergética organizados por mí, provocó gran asombro entre los físicos asistentes. De hecho hemos visto a lo largo de este libro que las fluctuaciones desempeñan un papel fundamental en muchos de los procesos sinergéticos.

Otro interesante intento de unificación de la observación de la naturaleza pertenece a Ilya Prigogine, quien partió de procesos químicos y bioquímicos. Para ello estableció una distinción entre las estructuras que, como las del cristal, una vez formadas perduran sin un aporte ulterior de energía, y las que necesitan un constante aporte de energía y tal vez también de materia. Un ejemplo de estas últimas lo constituye la estructura de alvéolos en forma de panal de abejas en los líquidos calentados por su capa inferior, como hemos visto en el capítulo 4. La energía térmica constantemente suministrada se convierte en parte en la energía cinética de los alvéolos. Pero el motivo por el cual los dibujos del líquido logran un estado estable reside en las constantes pérdidas por fricción, en las que se disemina o, en lenguaje técnico, se «disipa» una parte de la energía. Por esto, Prigogine las denominó «estructuras disipativas».

Su formación debía estar regida por determinado principio universal. Este principio, establecido por Glansdorff y Prigogine, hace referencia a la generación de entropía, es decir, de desorden a nivel microscópico, en los procesos disipativos. Pero, como demostraron Rolf Landauer y Ronald F. Fox, este principio lamentablemente no tiene validez universal, ni presenta siempre la pretendida cualidad de ser una llamada función de Ljapunov (que podemos explicar en los siguientes términos: así como una bolita sobre el cristal de la esfera de un reloj tiende a dirigirse al punto más bajo, la función de Ljapunov indica si un sistema se encamina hacia un estado estable). Aunque esto sólo tiene interés para los expertos, hay otro aspecto que salta a la vista: este principio no es en absoluto capaz de pronosticar qué «estructuras disipativas» se formarán. Por ejemplo, no puede predecir las propiedades de la luz láser ni la forma de las células de Bénard, es decir, de la estructura de panales de abejas en los líquidos.

Efectivamente sólo pueden hacerlo los modelos matemáticos empleados o desarrollados a ese efecto por la sinergética.

Más éxito tuvo un segundo camino, seguido por la Escuela de Bruselas: la formulación y el tratamiento matemático de un modelo químico que origina oscilaciones macroscópicas de las concentraciones de dos sustancias o también dibujos espaciales. En este modelo han de reaccionar entre sí dos sustancias químicas siguiendo determinadas reglas y difundirse en una o dos dimensiones, como en un papel secante; de modo muy similar al modelo de Gierer y Meinhardt que hemos comentado al hablar de la formación

de estructuras biológicas, por ejemplo. Estos modelos pueden considerarse como una ampliación sustancial del modelo de Turing, del que hablábamos en el capítulo 6. En el modelo de Turing debía ser posible un intercambio de sustancias entre *dos* células, en cada una de las cuales tenía lugar una reacción química, y así debía llegarse a una «diferenciación celular». Entretanto los trabajos más recientes de la Escuela de Bruselas han emprendido el camino que la sinergética había planteado desde el comienzo, en el problema del láser por ejemplo.

XVII. RESUMEN

Un nuevo principio

El lector que nos haya seguido hasta aquí habrá llegado pronto al final del libro. Al comienzo comparábamos un sistema complejo con un libro. Como este, tiene múltiples aspectos, y a menudo depende esencialmente de criterios subjetivos determinar las propiedades que caracterizarán un sistema complejo. Así le sucederá también al lector con este libro. Habrá conocido hechos de muy distintos ámbitos; algunos le habrán interesado más, otros, menos. Habrá conclusiones, sobre todo en el terreno económico y sociológico, que aprobará con entusiasmo y tal vez rechace indignado otras. Pero más allá de todas esas impresiones queda una pregunta que siempre se formulan los científicos: estas partes individuales, ¿constituyen al final un mosaico confuso o se integran en un todo unitario? En otras palabras, ¿ofrece este libro una nueva compresión de validez general? Para contestar esta pregunta quedémonos por ahora en el terreno de las ciencias naturales, es decir, de la física, la química, la biología y campos afines.

Al principio hablábamos de las dificultades con que seguía tropezando poco tiempo atrás la física para contestar a la pregunta sobre si la evolución de las estructuras biológicas armonizaba con sus principios fundamentales. Como hemos visto a través de una serie de ejemplos concretos, también en la naturaleza inanimada pueden formarse estructuras que requieren una corriente constante de energía para perdurar. Los ejemplos eran el láser con su emisión de luz estrictamente ordenada, las estructuras de panales en los líquidos y las ondas en espiral de la química. En todos estos ejemplos se trata de sistemas en los que hay un constante suministro de energía o también de nuevas sustancias; este suministro es transformado dentro del sistema y finalmente eliminado en forma modificada. Se trata de los llamados sistemas abiertos.

Aquí se aplican los nuevos conocimientos de la sinergética. Para los sistemas abiertos no vale ya el principio de que el desorden de un sistema librado a sí mismo crece continuamente. El viejo principio de Boltzmann de que la entropía es una medida del desorden y tiende a maximizarse sólo es válido en el caso de sistemas cerrados. Como hemos visto en el capítulo

2, a propósito del aumento del desorden, en este principio de Boltzmann todo dependía del número de posibilidades, por ejemplo, de las distintas posiciones de las moléculas de un gas, que un sistema podía realizar, en este caso todo el gas. Se trataba, por tanto, de un número determinado (de moléculas) y, con ello, de un principio *estático.* Ahora bien: ¿existe algún principio nuevo común a la formación de las estructuras en los sistemas abiertos? Es precisamente esto lo que ha sacado a la luz la sinergética.

En un sistema abierto sus diversos componentes prueban constantemente nuevas posiciones mutuas, nuevos movimientos o procesos de reacción en los que siempre participan numerosos componentes individuales del sistema. Bajo la influencia de la energía o la materia constantemente aportada, uno o varios de estos movimientos o procesos de reacción colectivos se muestran superiores a los demás. Estos desarrollos especiales van intensificándose cada vez más, como hemos visto en el caso de la onda láser y en el de la formación de rollos en los líquidos. Al final triunfan sobre las demás formas de movimiento y, según el término técnico de la sinergética, las esclavizan. Estas nuevas formas de movimiento —también llamadas modas— imprimen, pues, una estructura macroscópica, a menudo perceptible a simple vista, al sistema. Las nuevas situaciones a las que éste llega en general parecen presentar un grado de orden superior. Así tenemos ante nosotros un principio dinámico: todo depende de los índices de crecimiento de las modas; por regla general se imponen las modas que tengan el mayor índice de crecimiento, y éstas determinan las estructuras macroscópicas. Si varios de estos movimientos colectivos, también llamados ordenadores, tienen índices de crecimiento iguales, eventualmente también pueden llegar a cooperar y generar así una estructura completamente nueva. Para lograr que los índices de crecimiento sean positivos (también en la naturaleza existe el crecimiento cero o negativo), la alimentación de energía debe ser lo suficientemente grande. Con determinados valores críticos de la alimentación de energía puede cambiar macroscópicamente el estado general de un sistema; es decir, aparece un orden nuevo. La naturaleza emplea la energía que recibe según una suerte de ley del equilibrio. Conforme a la ley mecánica del equilibrio, podemos levantar cargas muy pesadas con poca fuerza siempre que el brazo de la palanca sea lo suficientemente largo. La naturaleza procede de manera similar en el caso de los sistemas abiertos que forman estructuras.

Un cambio insignificante en las condiciones ambientales, en la provisión de corriente en el láser o en la elevación de la temperatura de la capa de un líquido, por ejemplo, se ve multiplicado en sus efectos a raíz de que determinada forma de movimiento se vuelve cada vez más intensa. Según puede demostrarse matemáticamente, la intensidad de ese movimiento cumple el papel de brazo de una palanca; la modificación de las condiciones ambientales, el de nuestra fuerza sobre el brazo de la palanca; y el aumento del estado de orden macroscópico, el de la carga que debemos levantar.

Vínculos entre la naturaleza inanimada y la animada

El objetivo de la sinergética no es sólo hallar normas generales en la naturaleza inanimada, sino que precisamente quiere tender un puente entre la naturaleza inanimada y la animada. Dos nociones facilitan particularmente este vínculo: por una parte, el conocimiento de que también en la naturaleza animada tratamos, a fin de cuentas, con sistemas abiertos y, por otra, la idea de la lucha competitiva entre modas. Comencemos por esta última. La idea de que son los distintos índices de crecimiento de las formas de movimiento colectivo (o modas) los que deciden qué estructura prevalecerá, significa que tiene lugar una constante lucha competitiva entre estas distintas formas de movimiento. Esto es, desde luego, muy similar a la idea fundamental del darwinismo para la naturaleza animada, donde la lucha competitiva entre las especies es el motor de la evolución. Ahora podemos ver que el darwinismo es un caso especial de un principio aún más amplio. La competencia tiene lugar incluso en la materia inanimada. Según el actual estado de la ciencia, tales procesos de competencia intervienen en el crecimiento y desarrollo de su cerebro. Pero este principio de la competencia no sólo es válido para el mundo inanimado y los seres vivientes, sino también en la esfera espiritual, como hemos visto claramente en el caso de la sociología. Incluso se aplica a las nuevas ideas de la ciencia, las cuales conviven en una continua lucha competitiva y sólo pueden desarrollarse y ampliarse mediante el esfuerzo y la conciencia colectivos de los científicos.

La otra noción, que nos proponemos contemplar ahora con mayor detenimiento, se refiere a los sistemas abiertos, que pueden formar múltiples estructuras tanto en la naturaleza inanimada como en la animada.

La vida, entre el fuego y el hielo

La existencia del fuego, por ejemplo, el del sol, por una parte, y del frío gélido del espacio, por otra, significa que el cosmos no está en equilibrio térmico. Jamás lo estuvo, por otra parte. Cuando se formó el universo en el estallido inicial —según nuestras actuales concepciones—, era una bola de fuego increíblemente caliente. Pero el cosmos se expandió al mismo tiempo, y con ello se enfrió. Desde el comienzo existió, por tanto, el contraste entre el calor y el frío intensos. La persistencia de la vida depende de que el cosmos pueda mantener eternamente este contraste. Personalmente creo que todavía no se ha dicho la última palabra al respecto. Según las más recientes concepciones de los astrofísicos, a nuestro universo le está reservado un futuro muy movido y ciertamente no siempre favorable a la vida. El sol, por ejemplo, puede explotar en un futuro remoto y convertirse en un gigante rojo. Pueden formarse agujeros negros en el cosmos y atraer y tragarse todo lo que se encuentre en sus proximidades. Pero estos agujeros negros finalmente también pueden evaporarse. Al final, después de tantos ajetreos, podría desaparecer la energía y transformarse la materia de manera que en el espacio sólo quedasen unas enormes bolas de hierro como materia muerta.

Todas estas visiones de futuro se basan naturalmente en algunos supuestos. Uno de ellos es que el mundo se está expandiendo sin cesar. Esta expansión está científicamente bien fundamentada. La idea básica al respecto es muy simple y parte de la llamada huida de las nebulosas espirales, que se justifica con el llamado desplazamiento al rojo de la luz de esas nebulosas. El fenómeno del desplazamiento al rojo es un fenómeno bien conocido en física y consiste en lo siguiente: si un cuerpo en reposo emite luz amarilla, cuando el cuerpo se aleja de nosotros ésta se nos aparece desplazada hacia el rojo. Los astrónomos descubrieron hace ya mucho tiempo que las nebulosas más lejanas parecen «más rojas» que las más cercanas. De lo cual concluyeron que las nebulosas espirales más lejanas se van alejando, y precisamente tanto más deprisa cuanto más extrema sea su posición en el universo. La siguiente conclusión fue que el universo se encuentra en constante expansión. Pero, ¿continuará eternamente ésta? Es perfectamente posible que ese movimiento de expansión se detenga un buen día y que a partir de entonces el cosmos se contraiga. El proceso terminaría presumiblemente en una bola de fuego, y todo el juego podría recomenzar...

¿quizás en una eterna repetición? También es posible que en el cosmos se produzcan otras explosiones originales, tal vez más reducidas, de modo que se formen siempre nuevas fuentes de energía. Esta conclusión no me parece más especulativa que aquella otra según la cual la materia terminará por convertirse en esferas de hierro muertas.

¿Otras características de la vida?

Si la vida es posible gracias al contraste entre el frío y el calor, naturalmente podemos preguntarnos si no habrá vida en otras estrellas. Para ello suele pensarse, desde luego, en estrellas con condiciones parecidas a las del planeta Tierra. Pero como incluso la materia inanimada puede generar una multiplicidad de formas de movimiento colectivo, cabe especular con la posibilidad de que existan otras clases de vida. Como es sabido, el Sol es un plasma, en el que tienen lugar los más complejos movimientos colectivos, generalmente denominados inestabilidades. Esos procesos, ¿no podrían tener acaso unas cualidades que permitieran trazar una analogía con la vida? Aunque este razonamiento no sea del todo descartable, en el caso de la vida en la Tierra se agrega algo que no existe en los sistemas abiertos de la naturaleza inanimada. En efecto, si cortamos el suministro de energía, en un láser o en un líquido calentado por sus capas inferiores, la estructura formada se descompone casi de inmediato. Los seres vivientes, en cambio, han aprendido a forjar simultáneamente estructuras fijas. Esto vale tanto para sus materiales básicos, los biomoléculas, como por ejemplo el ADN, como para la estructura ósea o el cuerpo en su conjunto. La naturaleza ha sido, por ende, capaz de plasmar una y mil veces los procesos de creación de formas en estructuras fijas. Esto permite que los seres vivos puedan, además, seguir aprendiendo, ya sea como seres individuales, ya como conjunto de los seres vivientes que pudieron evolucionar de un grado al siguiente. Según creo, precisamente en esta frontera en las estructuras fijas y la función que estas estructuras deben cumplir luego y que a su vez las configura se abre aún un inmenso campo de investigación, y es de suponer que aquí podrá descubrirse principios básicos aún más fundamentales, cuya existencia hoy en día probablemente ni siquiera podemos vislumbrar.

Límites del conocimiento

En este libro hemos podido ver que la sinergética ha descubierto en terrenos muy distintos normas de la misma naturaleza en el desarrollo de las estructuras.

Determinados estados de orden crecen cada vez más y finalmente prevalecen, hasta esclavizar a todos los componentes de un sistema, incluyéndolos en el estado de orden. A menudo es una fluctuación no pronosticable la que establece la selección definitiva entre estados de orden en sí equivalentes. Estos fenómenos también se nos presentan en la esfera espiritual.

Vemos este tipo de evoluciones en la lengua, el arte, la cultura y el pensamiento en general. De pronto surge un nuevo estado ordenado. Igual que en el ensamblaje de las piezas de un rompecabezas, repentinamente queda clara una nueva orientación. Surge un estado de orden superior o, en la esfera espiritual, una mayor comprensión. En la esfera de las ciencias naturales y la técnica a menudo podemos calcular de antemano los nuevos estados ordenados. En la esfera puramente espiritual esto naturalmente no sucede. Pero reconocemos que rigen las mismas normas cualitativas.

Puesto que al fin y al cabo todo está constituido por materia y que ahora vemos que las leyes de la autoorganización no sólo no contradicen las leyes de la física sino que incluso concuerdan con ellas, naturalmente se impone la pregunta de si es necesaria la existencia de un creador. En este punto cada uno de nosotros tiene dos opciones. Es libre de creer, o no, en un creador. Uno dirá: ahora podemos comprender todas estas evoluciones, al menos en principio, en el terreno material. Todo surgió por autoorganización. El otro recordará, que en la construcción de calculadoras, por ejemplo, resulta muy difícil establecer reglas fundamentales que luego garanticen su autoorganización.

Este otro dirá, por tanto, puesto que todo surgió de manera tan maravillosa en la naturaleza, debe de haber habido un creador que forjó, antes que nada, las leyes correctas para que luego pudiera tener lugar la autoorganización de la materia.

Destaca además otro aspecto que no nos ha abandonado en ningún momento a lo largo de todo el libro y que tiene a la vez algo de inquietante. En toda formación de nuevos estados ordenados teníamos que contar con acontecimientos casuales, y a menudo el nuevo estado incluso venía deter-

minado definitivamente sólo por tales acontecimientos. Aquí nos encontramos con problemas que todavía no han quedado resueltos ni mucho menos. ¿Deberíamos acaso hablar del azar en la formación de una oscilación especial en el láser, y no hacerlo en el caso de determinada biomolécula?

En este punto reconocemos un primer límite, a mi juicio, fundamental, de nuestros conocimientos. Cada vez está más claro que en las ciencias naturales y, con mayor razón, en las esferas filosófica y sociológica existen problemas que son, por principio, irresolubles o que carecen de una solución única. Esto nos puede parecer sorprendente y aun chocante. Pero el matemático Kurt Gödel (nacido en 1906) pudo probar efectivamente que incluso en la rigurosa matemática hay problemas de los que se ignora si pueden resolverse; dicho más exactamente, no se logra definir el problema de su solución.

Si trasladamos estos conocimientos desde las matemáticas a otras disciplinas científicas, aunque sólo sea intuitivamente, deberemos contar con que habrá preguntas que, por principio, no podremos contestar. Esto puede decepcionar ante todo a los lectores jóvenes. Pero podemos consolarlos asegurándoles que existe un sinfín de problemas que pueden y deben resolverse para garantizar la supervivencia del género humano.

BIBLIOTECA CIENTÍFICA SALVAT

1. Stephen Hawking. *Una vida para la ciencia.* Michael White y John Gribbin
2. La verdadera historia de los dinosaurios. Alan Charig
3. La explosión demográfica. *El principal problema ecológico.* Paul R. Ehrlich y Anne H. Ehrlich
4. El monstruo subatómico. *Una exploración de los misterios del Universo.* Isaac Asimov
5. El gen egoísta. *Las bases biológicas de nuestra conducta.* Richard Dawkins
6. La evolución de la física. Albert Einstein y Leopold Infeld
7. El secreto del Universo. *Y otros ensayos científicos.* Isaac Asimov
8. Qué es la vida. Joél de Rosnay
9. Los tres primeros minutos del Universo. Steven Weinberg
10. Dormir y soñar. *La mitad nocturna de nuestras vidas.* Dicter E. Zimmer
11. El hombre mecánico. *El futuro de la robòtica* y *la inteligencia humana.* Hans Moravec
12. La superconductividad. *Historia y leyendas.* Sven Ortoli v Jean Klein
13. Introducción a la ecología. *De la biosfera a la antroposfera.* Josep Peñuelas
14. Miscelánea matemática. Martin Gardner
15. El Universo desbocado. *Del Big Bang a la catastrofe final.* Paul Davies
16. Biotecnologia. *Una nueva revolución industrial.* Steve Prentis
17. El telar mágico. *El cerebro humano* y *la computadora*. Robert Jastrow
18. A través de la ventana. *Treinta años estudiando a los chimpancés*. Jane Goodall
19. Einstein. Banesh Hoffmann
20. La doble hélice. *Un relato autobiográfico sobre el descubrimiento del ADH.* James Watson
21. Cien mil millones de soles. *Estructura y evolución de las estrellas*. Rudolf Kippenhahn
22. El planeta viviente. *La adaptación de las especies a su medio.* David Attenborough
23. Evolución humana. Roger Lewin
24. El divorcio entre las gaviotas. *Lo que nos enseña el comportamiento de los animales*. William Jordan
25. Lorenz. Alee Nisbett
26. Mensajeros del paraíso. *Las endorfinas, drogas naturales del cerebro*. Charles F. Levinthai
27. El Sol brilla luminoso. Isaac Asimov
28. Ecología humana. *La posición del hombre en la naturaleza.* Bernard Campbell

29. Sol, lunas y planetas. Erhard Keppler
30. Los secretos de una casa. *El mundo oculto del hogar*. David Bodanis
31. La cuarta dimensión. *Hacia una geometría más real*. Rudy Ruckcr.
32. El segundo planeta. *El problema del aumento de la población mundial.* U. Colombo y G. Turani
33. La mente (I). Anthony Smith
34. La mente (II). Anthony Smith
35. Introducción a la química. Hazel Rossotti
36. El envejecimiento. David P. Barash
37. Edison. Fritz Vógtle
38. La inestable Tierra. *Pasado, presente y futuro de las catástrofes naturales.* Basil Booth v Frank Fitch
39. Gorilas en la niebla. *¡3 años viviendo entre los gorilas.* Dian Fossev
40. El espejo turbulento. *Los enigmas del caos* y *el orden*. John Briggs y F. David Peal
41. El momento de la creación. *Del Big Bang hasta el Universo actual*. James S. Trefil
42. Dios y la nueva física. Paul Davies
43. Evolución. *Teorías sobre la evolución de las especies.* Wolfgang Schwocrbel
44. La enfermedad, hov. Lluís Daufí
45. Iniciación a la meteorología. Mariano Medina
46. Los niños de Urania. *En busca de las civilizaciones extraterrestres*. Evrv Schatzman
47. Amor y odio. *Historia natura! del comportamiento humano.* Irenaus EibI-Eibesfeldt
48. Matemáticas e imaginación (I). Edward Kasner y James Newman
49. Matemáticas e imaginación (II). Edward Kasner y James Newman
50. Darwinismo y asuntos humanos. Richard Alexander
51. La explosión de la relatividad. Martin Gardner
52. Las plantas. *Amores y civilizaciones vegetales*. Jean-Marie Pelt
53. La Tierra en movimiento. John Gribbin
54. Orígenes. *Lo cpie sabemos actualmente sobre el origen de la vida*. Robert Shapiro
55. Los rituales amorosos. *Un aspecto fundamental en la comunicación de los animales*. Eberhard Weismann
56. Del pez al hombre. Hans Hass
57. La liebre y la tortuga. *Cultura, biología y naturaleza humana.* David P. Barash
58. La frontera del infinito. *De los agujeros negros a los confines clel Universo.* Paul Davies
59. Las flechas del tiempo. *Una visión científica del tiempo.* Richard Morris
60. La naturaleza inacabada. *Ensayos en torno a la evolución.* Francisco J. Avala

61. Darwin. Julián Huxlev v H. B. D. Kettlewell
62. Fórmulas del éxito en la naturaleza. *Sinergética: la doctrina de la acción de conjunto*. Hermann Haken

FORMULAS DEL EXITO EN LA NATURALEZA

Sinergética: la doctrina de la acción de conjunto

HERMANN HAKEN

¿Es la energía, en todas y cada una de sus formas, el principio organizador de la naturaleza? ¿Pueden nacer estructuras nuevas y ordenadas de la materia inanimada y caótica? ¿Actúan los componentes y estructuras de la naturaleza contradiciendo los principios de la física?

El autor, padre científico de la *sinergética* (doctrina de la acción de conjunto) responde a todas estas preguntas y descubre correlaciones tan apasionantes como la formación de una corriente de opinión pública y los comportamientos colectivos en materia económica. De tal manera, la teoría física aplicada se revela como una sorprendente y actualísima cosmovisión.

Hermann Haken, nacido en 1927, se doctoró en matemáticas en la Universidad de Erlangen (RFA) en 1951. Desde 1960 es profesor titular de física teórica en la Universidad de Stuttgart. Es uno de los padres de la teoría del láser. Autor de muchos libros entre los que destacan: Teoría de los campos cuánticos, Introducción a la sinergética, Luz y materia I y II, Física atómica y cuántica. En 1976 recibió el premio Max Born y la medalla del British Institute of Physics y de la Sociedad Física Alemana por sus trabajos sobre la física de los cuerpos sólidos y la teoría del láser. En 1981 fue galardonado con la medalla Albert A. Michelson del Instituto Franklin, Philadelphia (EE.UU.) por sus estudios precursores de la sinergética.

